

**ЛИТОЙ
МИКРОПРОВОД
И ЕГО
СВОЙСТВА**



КОНСТРУКЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СЕРИАЛ

АКАДЕМИЯ НАУК МОЛДАВСКОЙ ССР
Ордена Трудового Красного Знамени
Институт математики с Вычислительным центром

*Е. Я. БАДИНТЕР, Н. Р. БЕРМАН, И. Ф. ДРАБЕНКО,
В. И. ЗАБОРОВСКИЙ, З. И. ЗЕЛИКОВСКИЙ, В. Г. ЧЕБАН*

ЛИТОЙ МИКРОПРОВОД И ЕГО СВОЙСТВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ШТИЙНЦА» * КИШИНЕВ * 1973

УДК 621.315.332.6

Монография посвящена вопросам исследования и производства литых микропроводов в стеклянной изоляции диаметром до 1 мкм. Впервые обобщен отечественный и зарубежный опыт в этой области.

Рассматриваются физические основы литья микропровода, технологические режимы и специализированное технологическое оборудование для его производства. Приводятся результаты исследований свойств микропроводов из различных металлов и сплавов, а также методы и аппаратура для изучения их и контроля.

Книга рассчитана на специалистов в области микрометаллургии, технической физики и прикладной механики, на инженеров, конструкторов и технологов по электро- и радиоприборостроению, электронной и полупроводниковой технике, научных работников, студентов и преподавателей вузов соответствующего профиля.

Б $\frac{3-3-10-65}{M755(12)-73}$ 97-72

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных материалов, позволяющих обеспечить в приборостроении решение вопросов, связанных с миниатюризацией, повышением точности и стабильности, расширением диапазона допустимых климатических и механических воздействий, является микропровод в стеклянной изоляции.

Сверхмалый диаметр микропровода — до 1 мкм — обеспечивает существенное снижение массы и габаритов элементов из микропровода, уменьшает их механическую, тепловую и электрическую инерционность. Сплошная стеклянная изоляция предохраняет материальную жилу от внешних воздействий и является предпосылкой для длительной стабильности, высокой надежности и точности элементов из микропровода, этому способствует также литая структура материала жилы. Высокая механическая прочность микропровода является залогом его технологичности в условиях промышленного производства, а относительно невысокая стоимость делает элементы из микропровода экономичными.

Впервые тонкие металлические нити в стеклянной изоляции (из жидкой фазы металлов) были получены в 1924 г. Тейлором. Метод получения микропровода усовершенствовал в 1940 г. Ф. А. Маковский. Сущность способа заключается в нагреве навески металла в горизонтально расположенной стеклянной трубке газовой горелкой до размягчения трубки и плавления металла с последующим быстрым растягиванием трубки. Метод не получил достаточно широкого распространения из-за ограниченной длины микропровода и неконтролируемости его параметров.

Новый способ получения литых микропроводов был предложен в 1948 году проф. А. В. Улитовским. Сущность этого способа в следующем: происходит непрерывное заполнение жидким металлом капилляра, вытягиваемого из вертикально расположенной стеклянной трубки.

Навеска металла находится во взвешенном состоянии в высокочастотном электромагнитном поле, что создает возможность получения микропровода достаточно длинных отрезков.

Первые работы по исследованию процесса литья микропровода и его свойств проводились в пятидесятых годах под руководством А. В. Улитовского, Н. М. Авериним, В. Г. Красиньковым, В. М. Матвеевым, А. А. Меркуловым, М. А. Потаповым, В. Г. Тимофеевым, В. В. Трояновским, В. Ф. Шпирновым и др. Большое внимание исследованию процесса литья уделял в те годы проф. Б. А. Остроумов.

В 1958—59 гг. в Кишиневе были созданы Научно-исследовательский институт электроприборостроения и завод «Микропровод». Благодаря этому возникли условия для проведения комплексных работ по исследованию процесса литья микропровода, созданию промышленной технологии его производства, всестороннему изучению свойств, по разработке методов и аппаратуры для исследования и контроля. Масштабы этих работ были связаны с постоянным увеличением объемов и номенклатуры промышленного производства элементов и приборов из микропровода.

В этот период и в последующие годы исследования промышленное производство микропровода и изделий из него было налажено в Ленинграде, Подольске, Горьком, Пензе, Тбилиси и некоторых других городах нашей страны.

В начале шестидесятых годов появились работы в области микропровода и за рубежом (Англия, ФРГ, США, Франция, Япония).

Постоянный интерес, проявляемый иностранными фирмами к работам, проводимым в Советском Союзе в области микропровода, покупка ими лицензий, образцов оборудования свидетельствуют, по-видимому, что эти работы за рубежом еще не получили достаточного развития.

Опубликованные до настоящего времени материалы по рассматриваемому вопросу представляют собой отдельные журнальные статьи, сборники докладов конференций. В предлагаемой книге впервые обобщаются материалы по теории и технологии литья, свойствам микропроводов, методам и аппаратуре для их исследования.

Книга состоит из двух разделов. Первый посвящен физическим основам литья микропровода, технологическим режимам и специализированному технологическому оборудованию для производства микропровода капельным и непрерывным способами, исходным материалам (металлы, стекло) для микропроводов, анализу промышленного производства микропроводов, путям механизации и автоматизации процесса литья. Особое внимание уделено физическому обоснованию и техническим возможностям получения микропроводов заданных и стабильных параметров.

Во втором разделе описаны свойства микропроводов из различных металлов и сплавов, методы и аппаратура для лабораторных ис-

следований и промышленного контроля свойств. Подробно изложен метод горизонтальной нити.

В основу коллективной монографии положены результаты исследований авторов в Кишиневском НИИ электроприборостроения и Институте математики с ВЦ АН МССР. Кроме того, использованы и обобщены материалы, полученные ранее другими исследователями.

Книга рассчитана на научных сотрудников и инженерно-технических работников в области микропровода и его применения, конструкторов и технологов по миниатюризации приборостроения и электронной техники, кроме того, она может представлять интерес для научных работников и студентов вузов соответствующих специальностей.

Авторы приносят благодарность проф. В. И. Рыкову, доктору физ.-мат. наук В. А. Коварскому и члену-корреспонденту АН МССР Г. В. Чалому, сделавшим ряд ценных замечаний, а также В. Г. Харитончику и Л. И. Шмидт за помощь при подготовке рукописи к изданию.

Авторы будут признательны читателям за замечания и пожелания, направленные в адрес редакции.

ЛИТЫЕ МИКРОПРОВОДА В СТЕКЛЯННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

ГЛАВА I

ОСНОВЫ ЛИТЬЯ МИКРОПРОВОДА В СТЕКЛЯННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

§ 1. Общие сведения

Производство тонкой и сверхтонкой неизолированной микропроволоки и микропровода в стеклянной изоляции в настоящее время может осуществляться с использованием некоторых способов и технологических приемов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Одним из старейших способов получения тонкой микропроволоки является способ Волластона [1], с помощью которого можно получать микропроволоку диаметром до 0,5 мкм (проволока Волластона). При реализации этого способа заготовка исходного материала подвергается волочению с помощью несколько большей вспомогательной оболочки в виде пластичной серебряной трубки. Конечные размеры получаемой при этом микропроволоки определяются из расчета, что отношение размеров исходной заготовки к размерам вспомогательной оболочки остается постоянным в течение всего процесса совместной деформации. После окончания процесса волочения серебряная оболочка удаляется путем электролиза или стравливается азотной кислотой. Серебряная оболочка может быть заменена оболочкой из менее дефицитных металлов, однако в целом описанный способ отличается большой сложностью и весьма дорог.

Для получения микропроволоки из алюминия, вольфрама и других металлов используют широко распространенный способ электролитического утонения заготовки в виде проволоки предельно наименьших размеров. Способ электролитического утонения заготовки, как и способ Волластона, отличается высокой трудоемкостью и значительными невозвратимыми потерями металла, в связи с чем применяется лишь в крайних случаях.

На рис. 1 показан способ получения микропроволоки из расплава Al, Cu, Ag, Sn, Pb и других металлов и сплавов путем фонтанирования сквозь калиброванное отверстие под давлением от 2 до 10 ат

мосфер. Способ обеспечивает возможность высокопроизводительного процесса формирования микропровода в виде путаных отрезков длиной в несколько метров, диаметром от 50 до 100 мкм. Получение микропровода в виде длинных отрезков указанным способом ограничи-

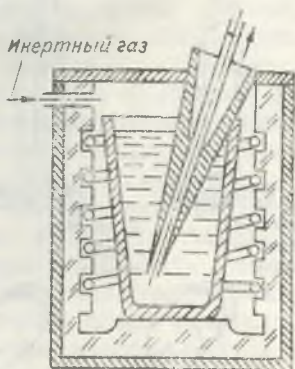


Рис. 1. Получение микропровода путем фонтанирования расплава легкоплавких металлов и сплавов

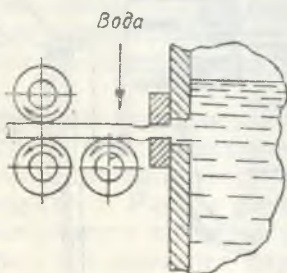


Рис. 2. Получение тонкой алюминиевой проволоки при истечении металла непосредственно из плавильной ванны

вается сложностью решения технической задачи согласования скорости фонтанирования металла и его приема каким-либо механическим устройством [2—4].

В последние годы нашли широкое применение различные способы получения тонкой проволоки непосредственно из плавильных печей путем истечения расплавленного металла из плавильных ванн через одну или несколько дюз либо за счет использования сил поверхностного натяжения расплава и некоторого приложенного усилия его вытяжки (рис. 2) [2]. Указанные способы отличаются простотой используемого оборудования, но пригодны для получения проволоки относительно больших диаметров, малоинтенсивны и в этом отношении уступают известным способам получения проволоки из легкоплавких металлов путем их разлива в непрерывно бегущую литейную форму [5, 6]. В целом процесс вытяжки изделий, в том числе микропровода непосредственно из расплава металлов, имеет принципиальные преимущества. В первую очередь это возможность достижения высокого совершенства структуры проводника (в частности, монокристаллов) за счет роста изделия в свободном объеме, т. е. в условиях, когда вероятность появления в нем напряжений при затвердевании минимальна.

К числу наиболее эффективных способов получения микропровода следует отнести способы, использующие эффект текучести расплава металлов и сплавов в термопластичной, формообразующей оболочке.

Один из способов получения тонких металлических нитей путем перетяжки расплава металлов в вязкой стеклянной оболочке впервые описан Тэйлором [7] еще в 1924 году. В последующие годы им же на

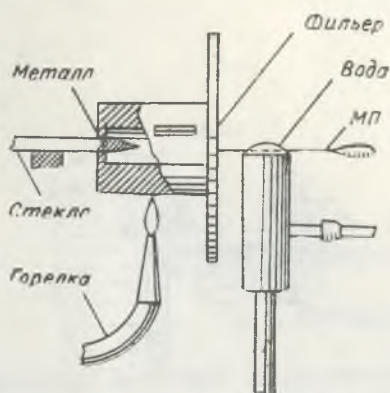


Рис. 3. Получение микропровода путем перетяжки расплава металлов в вязкой стеклянной оболочке по методу Тэйлора

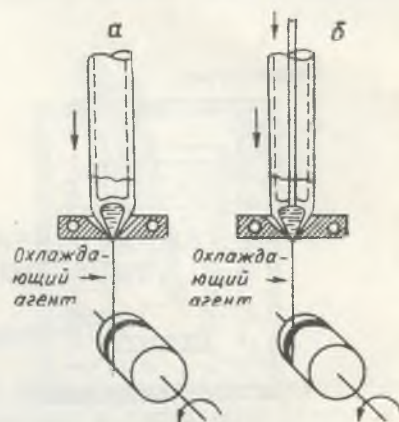


Рис. 4. Получение микропровода в стеклянной изоляции из расплава металлов и сплавов по методу А. В. Улитовского:

а — «капельный» способ; б — «непрерывный» способ

описанный способ (рис. 3) была оформлена патентная заявка [8]. Заявкой предусматривалась возможность получения тонких проводников в стеклянной изоляции в виде коротких отрезков из металлов, температура плавления которых ниже температуры размягчения используемого стекла на 150—200°C.

Представляет большой интерес возможность получения микропровода путем протяжки струи расплавленного металла сквозь расплав солей или массу вязкого стекла, выполняющих роль кристаллизатора, эластичной литейной формы и источника для формирования изоляционного покрытия [9, 10]. Однако указанный способ, как и другие, до настоящего времени не нашел должного применения в промышленности. В связи с этим рассмотрим более подробно способ получения микропровода в стеклянной изоляции из проводниковых и резистивных металлов и сплавов. Способ основывается на работах советских и зарубежных ученых и изобретателей, и в первую очередь на исследованиях А. В. Улитовского [11—28] (рис. 4).

Сущность процесса формирования микропровода рассматриваемым способом может быть сведена к следующему. Навеска металла в несколько грамм помещается в стеклянную трубку с опаянным донцом и вместе с последней вводится в индуктор высокочастотной установки.

Под действием магнитного поля индуктора навеска металла плавится и размягчает примыкающие к ней стенки стеклянной трубки. Кроме расплавления металла магнитное поле индуктора обеспечивает поддержание металла в средней части индуктора во взвешенном состоянии в виде микрованны — капли расплавленного металла в вязкой стеклянной оболочке на конце стеклянной трубки. В дальнейшем, путем прикосновения к донцу микрованны стеклянным штабиком, часть ее оболочки оттягивается на специальное приемное устройство в виде стеклянного капилляра со сплошным металлическим заполнением в виде непрерывной токопроводящей жилы. На пути от микрованны до приемного устройства микропровод проходит через кристаллизатор в виде струи охлаждающего агента.

Процесс формирования стеклянного капилляра осуществляется непрерывно за счет стекла, стягиваемого со всей поверхности микрованны, при этом убыль стекла равномерно компенсируется непрерывной подачей стеклянной трубки в зону индуктора. Расход металла на формирование жилы микропровода ограничивается исходной навеской микрованны и восполняется периодически, что вызывает нарушение процесса получения (литья) микропровода и необходимость новой наладки процесса.

В других случаях, в зависимости от свойств используемого металла и размеров получаемого микропровода, уровень металла в микрованне непрерывно восстанавливается вводимым в нее стержнем шихтового металла. В соответствии с приведенными способами восполнения расходуемого металла способы получения микропровода подразделяются на «капельный» и «непрерывный».

§ 2. Физико-химические превращения микрованны в процессе литья микропровода

Опыт показывает, что формирование микропровода в стеклянной изоляции находится в сложной зависимости от физико-химических процессов, протекающих в микрованне под воздействием высоких температур и магнитного поля высокочастотного индуктора.

Для изучения этих процессов был рассмотрен ход литья микропровода из однокомпонентных и многокомпонентных металлов с различной активностью по отношению к кислороду. Металлографические и химические исследования различных микрованн и соответствующих им образцов микропровода показали, что практически все металлы и сплавы, из которых возможно получение микропровода, вступают в процессе литья в активное взаимодействие с окружающим стеклом. Характер такого взаимодействия в какой-то степени определяет по времени начало и окончание процесса литья и качественные показатели получаемого микропровода.

Установлено, что в результате срыва частиц стекла вихревыми по-

токами металла с внутренней поверхности стеклянной оболочки и их внедрения в микрованну при ее заправке, остаток микрованны к концу процесса литья представляет собой шихту на основе исходного металла, мелких частиц стекла, силикатов исходного металла и его окислов. При литье медного и марганцевого микропровода примерно на второй минуте после заправки микрованны частицы стекла распределяются по ее объему неравномерно в виде отдельных крупных включений (рис. 5, вкл. 1). В этот период взаимодействие металла со стеклом на шлифах микрованны незаметно, вхождение металла в капилляр носит случайный характер, спай металла жилы со стеклянной изоляцией недостаточен, наличие силикатов и окиси меди в микрованне незначительно. Дальнейшее насыщение микрованны силикатами и окислами достигает оптимального отношения к общему объему медной микрованны на 4—5-й минуте, а для марганцевой микрованны — на 10—15-й минуте (рис. 6, вкл. 1; рис. 7, вкл. 1; табл. 1). Рассматриваемый период пре-

Таблица 1

Распределение силикатов в процессе литья марганцевого микропровода

Время от заправки микрованны, мин.	Вес микрованны, г	Общее содержание силикатов, % к весу микрованны	Содержание силикатов в верхней части, % к весу микрованны	Содержание силикатов в нижней части, % к весу микрованны	Общее содержание SiO ₂ , % ко всему осадку	Содержание в верхней части SiO, %	Содержание в нижней части SiO, %	Содержание силикатов во внешней оболочке	
								верхняя часть, % к осадку	нижняя часть, % к осадку
3	1,99	0,45	0,42	0,43	19,8	11	8,8	91	40,5
10	2,27	0,75	0,83	0,66	44,1	19	25,3	74	60,5
20	1,52	0,85	0,87	0,81	34,9	24	10,9	47,4	51,0
38	1,19	1,21	1,4	1,00	17,5	6,3	11,2	46,0	40,0

образования в микрованне совпадает с установлением устойчивого процесса формирования микропровода. В последующие периоды времени изменение содержания силикатов и окислов в микрованне приводит к полному обрыву процесса. В случае получения особо тонкого медного микропровода при продолжительности процесса более 30 минут в микрованне наблюдается массовый переход силикатов в толщу металла, что совершенно меняет ее структурный состав (рис. 8, вкл. 1) и говорит о химических процессах, протекающих в ней в результате взаимодействия стекла и меди. Отмечено, что дендриты силикатов в исследованных микрованнах довольно строго обособлены от дендритов окиси меди, что свидетельствует о рекомбинации процесса образования силикатов меди и роли силикатов как проводников кислорода.

При исследованиях процесса литья серебряного микропровода установлено, что распределение силикатов между кристаллами металла микрованны равномерно и не меняет своего вида до конца процесса литья. Это, по-видимому, в некоторой степени объясняет малое время наладки и устойчивость процесса литья серебряного микропровода. Возможно,

Таблица 2

Содержание Cu_2O , CuO и силикатов меди на поверхности медной микрованны

Вес микро- ванны, г	Поверх- ность микро- ванны, мм ²	На поверхности микрованны				В стекле микрованны				Всего							
		Cu_2O		CuO		Cu_2O		CuO		Cu_2O		CuO		Cu_2O			
		на мм ² поверх- ности	всего	на мм ² поверх- ности	всего	на мм ² поверх- ности	всего	на мм ² поверх- ности	всего	на мм ² поверх- ности	всего	на мм ² поверх- ности	всего	на мм ² поверх- ности	всего		
2,8501	113,4	750,0	6,61	100,0	0,881	225	2,0	25,8	0,23	800	7,1	975	8,61	125,8	1,1	800	7,1
2,6043	106,0	562,5	5,80	1025,0	1,06	450	4,2	225	2,1	930	8,8	1012,5	9,5	337,5	3,16	930	8,8
4,1139	145,0	475,0	3,30	47,5	0,33	163,5	1,1	86	0,6	1350	9,3	638,5	4,4	133,5	0,93	1550	9,3
3,9591	143,0	725,0	5,10	145,0	1,01	1287	9,0	280	2,0	1175	8,2	2012	14,1	425	3,01	1175	8,2

Таблица 3

Содержание Cu_2O , CuO и силикатов меди в медной микрованне и соответствующем ей микропроводе

Вес микро- ванны, г	Внутри микрованны				Навеска, мг	В микропроводе, мкг					
	Cu_2O , мкг		CuO , мкг			Cu_2O		CuO			
	всего, в (г)	на мг на- вески	всего	на мг на- вески		всего	на мг на- вески	всего	на мг на- вески		
2,85	32000	11,2	87,5	0,90	41	455,0	11,1	65	1,60	187,5	4,6
2,60	13000	5,0	110,0	0,80	73	425,0	5,8	185	2,53	246,0	3,4
4,11	7000	1,7	105,0	0,90	83	437,0	5,2	125	1,50	262,5	3,2
3,96	11500	2,9	131,0	0,64	60	580,0	9,7	165	2,75	145	2,4

что здесь формированию микропровода способствует скорость взаимодействия металла и силикатов и образование окислов за счет связанного кислорода (закиси серебра).

Исследованиями установлено, что изменения качественных показателей микропровода в процессе литья резко выражены на участках, соответствующих периодам активного преобразования микрованны, в том числе за счет перераспределения в ней окислов шихтового металла. В работах, выполненных под руководством академика АН МССР Ю. С. Ляликова, динамика преобразований микрованны исследовалась путем тщательного химического анализа содержания окислов и силикатов меди на различных этапах литья микропровода из меди и многокомпонентного манганинового сплава. При этом анализировались окислы и силикаты меди непосредственно в толще металлической жилы микропровода на ее поверхности и в спае со стеклянной изоляцией (табл. 2 и 3). Исследования состава микрованны и микропровода осуществлялись по специально разработанной методике [29]. Фазовое разделение окислов производилось на установке для фазового анализа; для определения выделенных фаз использовался метод переменного тока полярографии. При исследовании жилы микропровода стеклянная изоляция снималась с помощью плавиковой кислоты. Установлено, что оптимальное время обработки медного микропровода плавиковой кислотой равно 6 минутам. За это время обеспечивается полное растворение стеклянной изоляции и переходного слоя без заметного разрушения

Таблица 4

Содержание меди в переходном слое
металл — стекло медного микропровода

Вес образца, мг		Количество стекла, % к весу	Количество Си, перешедшее в раствор	
до обработки HF	после обработки HF		γ/мг навески	среднее
36,3	14,9	58,0	7,1	7,16 ± 0,22
35,8	14,8	58,7	7,5	
26,5	11,1	58,1	6,9	
38,5	11,5	70,0	1,38	1,42 ± 0,12
37,5	11,0	70,5	1,28	
35,6	10,5	70,5	1,60	

жилы. Достаточно высокая степень воспроизводимости (табл. 4) дает основание для использования рассмотренного метода в практике определения характера переходного слоя различных образцов микропровода.

Содержание неметаллических включений (окислов и силикатов меди) в переходном слое можно связать с соотношением между диамет-

ром жилы и толщиной изоляции (табл. 5 и 6). Как видно из табл. 6, количество силикатов и окислов, образующихся в переходном слое микропровода, тем меньше, чем меньше соотношение его геометрических размеров.

Таблица 5

Результаты исследований переходного слоя металл—стекло в медном микропроводе с различным соотношением D и $d_{ж}$

Количество стекла, % к весу	Фазовый анализ всего МП				Анализ переходного слоя		Фазовый анализ жилы			Всего в переходном слое и жиле Cu, $\gamma/\text{мг}$
	Cu ₂ O, $\gamma/\text{мг}$	CuO, $\gamma/\text{мг}$	силикат Cu, $\gamma/\text{мг}$	всего по Cu, $\gamma/\text{мг}$	Cu, $\gamma/\text{мг}$	Cu, % ко всему содержанию	Cu ₂ O, $\gamma/\text{мг}$	CuO, $\gamma/\text{мг}$	силикат Cu, $\gamma/\text{мг}$	
36,0	9,7	2,7	8,0	20,4	15,3	75	2,9	1,5	0,7	20,4
46,8	3,5	2,5	8,5	14,5	10,9	75	1,9	1,3	0,3	14,4
51,8	2,9	2,5	4,1	9,5	6,5	69	1,6	1,0	—	9,1
58,6	5,7	3,4	3,6	12,7	6,8	54	2,7	2,0	0,2	11,7
65,0	2,5	1,6	3,8	7,9	4,1	52	1,3	1,1	0,2	6,7

Дополнительные исследования содержания Cu и Si в силикатах меди, проникающих в жилу медного микропровода, дают возможность представить их в виде формулы $\text{Cu}_2^+ \text{Cu}(\text{SiO}_3)_2$.

Таблица 6

Содержание окислов и силикатов меди в переходном слое металл—стекло медного микропровода в зависимости от $d_{ж}$ и $\Delta_{из}$

Количество стекла, % к весу	Отношение количества стекла к количеству металла жилы	$d_{ж}$, мкм	$\Delta_{из}$, мкм	$\frac{d_{ж}}{\Delta_{из}}$	Количество неметаллических включений в переходном слое, % ко всем микровключениям микропровода
36,0	1,78	22	11	2,00	75
46,8	1,13	18	12	1,50	75
51,8	0,93	13	16	0,81	69
58,6	0,70	13	18	0,72	54
65,0	0,54	10	20	0,5	52

Как видно из рис. 9, кривые содержания окислов на поверхности микровани при литье микропровода из меди и манганина имеют одинаковый характер. В то же время, как подтверждает практика, разница в количестве окислов на единицу поверхности двух микровани соответствует разнице во времени наладки устойчивого процесса получения медного и манганинового микропровода. Исследования показывают, что для каждого металла количество окислов в микрованне и микропроводе в каждый момент процесса литья взаимно сбалансировано и сумма

их для принятых условий остается примерно постоянной (табл. 7).

Результаты анализа окислов в микрованнах при литье медного микропровода «непрерывным» способом (табл. 8) дают основание считать, что при получении микропровода малых диаметров, когда микро-

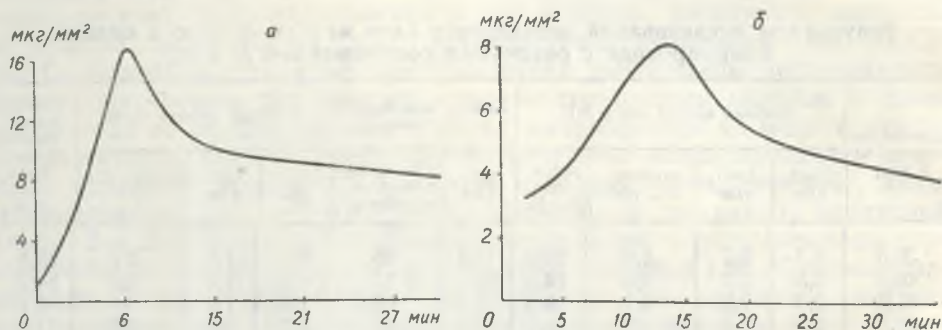


Рис. 9. Содержание $\text{Cu}_2\text{O} + \text{CuO}$ на поверхности микрованны:

а — по ходу процесса литья медного микропровода; *б* — по ходу процесса литья марганцевого микропровода

ванна находится продолжительное время под воздействием высоких температур в соприкосновении с относительно большими массами движущегося стекла, перенасыщение микрованны окислами действует на ход процесса так же отрицательно, как и их недостаток при «капельном» процессе.

Таблица 7

Баланс Cu_2O и CuO в процессе литья медного микропровода капельным способом

Время от заправки микрованны, мин.	Содержание $\text{Cu}_2\text{O} + \text{CuO}$, γ		
	микрованна	микропровод	всего
3	5050	—	5050
6	6290	50	6340
10	6180	201	6381
13	5094	1300	6394
17	4540	1810	6350
21	2215	4000	6215
3	7116	—	7116
6	9865	60	9925
10	9770	190	9960
20	6104	3690	9794
25	4010	5600	9610
31	3646	6015	9661

Содержание окислов и силикатов меди в микрованне при „непрерывном“ процессе литья медного микропровода

Бес микро- ванны, г	Поверх- ность микро- ванны, мм ²	На поверхности микро- ванны		На поверхности стекла			Внутри микрованны	
		Cu ₂ O, всего	Cu, всего	Cu ₂ O	CuO	Cu ₂ SiO ₃ CuSiO ₃	Cu ₂ O, всего	Cu, всего.
		γ/мм ² поверхнос- ти	γ/мм ² поверхнос- ти				γ/м ²	γ/м ²
7,44	214	6775	9875	1531	170	3556	94 000	2760
		31,6	46,0	7,1	0,8	16,6	12,7	0,37
7,98	207	6875	1138	3375	728	2856	21 000	3100
		33,2	35,0	16,3	3,5	13,8	3,1	0,45

Теперь рассмотрим вопрос о характере реакций на межфазной границе стекло—металл. В работе [30] делается предположение о наличии на поверхности металлической жилы микропровода окисной пленки, якобы способствующей процессу смачивания стеклянного капилляра и заполнению его жидким металлом. С точки зрения электронной теории возможность существования окисной пленки (на основе окислов высшего порядка) как посредника для связи металла со стеклом в случае получения микропровода должна быть исключена, так как сам процесс образования окислов высшего порядка завершает процесс взаимодействия электронных оболочек данных атомов и исключает какую-либо возможность наличия у окисной пленки (на граничном слое со стеклом) незавершенных электронных оболочек или свободных атомов, способных к взаимодействию [31, 32]. В связи с изложенным можно предполагать, что механизм сцепления металла со стеклом в процессе формирования микропровода может иметь следующую природу:

1. Взаимодействие между поверхностями, основанное на взаимодействии некомпенсированных молекулярных сил. Если подобный механизм существует, то на границе металл—стекло должен обнаруживаться переходный слой из элементов стекла и металла жилы величиной в сотые доли микрона.

2. Связь между стеклом и металлом микрованны в зоне конуса вытяжки микропровода осуществляется на основании образования твердых растворов, взаимодействующих поверхностей при определенных температурах. В данном случае имеется в виду взаимодействие между сформировавшимися кристаллографическими формациями и отдельными атомами, которые могут создать на базе уже этих формаций твердые растворы в вычитании внедрения или замещения. Как показывают опыты, структура подобных твердых растворов может быть упорядоченной или неупорядоченной. И поскольку процесс ее формирования про-

текает между соприкасающимися слоями, образованный граничный слой может иметь протяженность порядка десятка микрон и более (рис. 10) [33].

3. В случае, если в процессе литья микропровода создаются условия, при которых соприкасающиеся слои металла микропровода и стеклянной оболочки в зоне конуса вытяжки микропровода имеют определенное сходство с электронами, а сами внешние (валентные) оболочки не заполнены (до оболочки инертных газов), вероятно образование устойчивых химических соединений, которые с кристаллографической точки зрения отличаются от структуры взаимодействующих материалов. Тогда толщина граничного слоя между стеклом и металлом будет не больше, чем для твердых растворов, но более отчетливо выражена в смысле границ (рис. 11, вкл. 2 и 12, вкл. 2) [34].

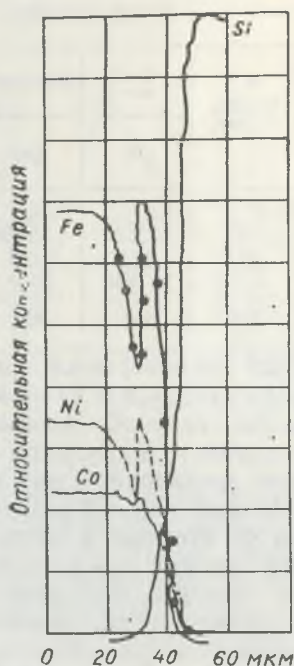
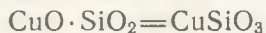


Рис. 10. Концентрационное распределение элементов в переходном слое, зафиксированное методом рентгеновского микроанализа. Жила микропровода на основе сплава Fe, Ni, Co; стеклянная оболочка микропровода на основе стекла ЗС-5. На рисунке показано постоянное положение концентрации элементов сплава жилы и повышение в направлении от металла к стеклянной оболочке концентрации Si

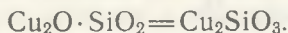
При образовании указанных химических соединений процесс протекает только между теми атомами материалов, для которых степень электроотрицательности Δh характеризуется минимальным отношением $\frac{r_k}{r_a}$ и определенным значением среднего квантового числа n . Что касается других атомов, которые присутствуют в момент формирования химического соединения, то они либо облегчают процесс, либо мешают ему. Поэтому можно считать, что во всех случаях для обеспечения нормального процесса литья микропровода необходимо знать с большой точностью химический состав исходных материалов и энергию активации при температурных условиях процесса.

Исходя из сказанного, литой микропровод (в своем лучшем качестве) — токопроводящая жила в виде литого металла или сплава металлов (предпочтительно с пониженным содержанием растворимых газов по всей длине), имеющая изоляционное покрытие в виде сплошной стеклянной оболочки. При этом на границе раздела токопроводящей нити и стеклянной оболочки должен быть равномерный переходный

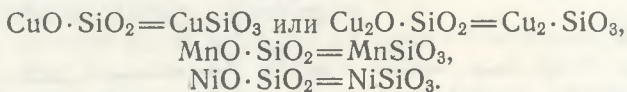
слой, представляющий собой твердый химический раствор элементов стеклянной оболочки и токопроводящей нити на основе окислов низшего порядка. В частности, для медного микропровода переходный слой должен иметь вид образования с химической ковалентной или координационно-ковалентной связью и возможной трансляцией связи типа



или



Для марганцевого микропровода переходный слой предпочтительно должен иметь вид образования с химической ковалентной или координационно ковалентной связью и возможной трансляцией связи типа



Исследования показывают, что характер переходного слоя, а с ним и свойства получаемого микропровода зависят от свойств и характера взаимодействия принятой пары металл—стекло и фактических размеров диаметра жилы микропровода и его изоляции.

В работе [35] указывается, что на границе стекло—металл при литье микропровода из никельхромовых сплавов вероятнее всего имеет место кислотно-основное (опорно-акцепторное) взаимодействие, подчиняющееся правилу: чем более основным является окисел металла, тем более прочно соединение $(\text{MeO}) \cdot (\text{SiO}_2)_y$. При этом контактное взаимодействие металла и стекла при температурах процесса приводит не только к образованию двойного электрического слоя, обусловленного переходом анионов кислорода через межфазную границу, но и к возникновению промежуточной фазы [35, 36]. Там же отмечается, что свойства промежуточной фазы определяют технологическую устойчивость процесса литья. Введение в сплав 6—10% кремния, обладающего в этом интервале концентраций наибольшей раскислительной способностью в никелевых сплавах [37], резко меняет свойства пары стекло—металл, обеспечивая устойчивый процесс литья. В работе [35], в частности, показано изменение концентрации кислорода в никелевом расплаве в зависимости от содержания кремния, там же высказано предположение, что переходный слой при литье микропровода из никельхромовых сплавов имеет строение



Рассмотрим теперь результаты исследования изменения химического состава металла по ходу процесса литья для таких весьма распространенных в производстве микропровода сплавов, как марганец и Н60ГХ, разработанных для фильерного метода, а также сплава, со-

став которого был выбран с учетом технологических особенностей процесса литья микропровода. Изменение содержания основных элементов манганина по ходу процесса литья микропроводов представлено на рис. 13. Приведенные кривые отображают тенденцию сплава. Содержание никеля изменяется незначительно и может считаться стабильным.

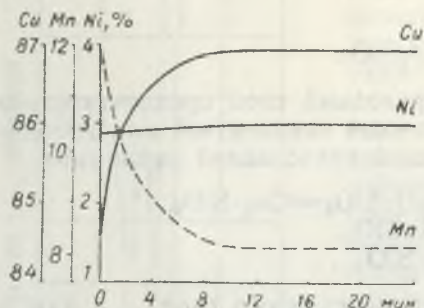


Рис. 13. Изменение содержания меди, марганца и никеля в манганине по ходу процесса

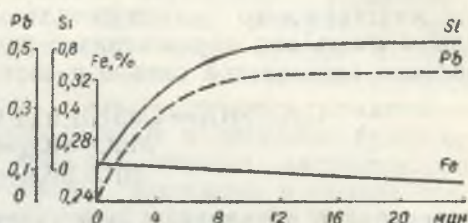


Рис. 14. Изменение содержания примесей в манганине (свинец, кремний, железо) по ходу процесса

Содержание меди колеблется и приближается к 2%, что обусловливается изменением содержания марганца в сплаве. Содержание марганца в металле в начале процесса заметно падает и составляет к девятой минуте примерно 8%, т. е. на 4% меньше, чем в исходном манганине. В дальнейшем марганец приходит к подвижному равновесию и остается примерно на одном и том же уровне в течение всего последующего периода плавки.

Известно, что в металлургических процессах марганец сравнительно легко выгорает, особенно при наличии в металле заметного содержания кислорода. Кроме того, при определенных температурах процесса марганец может испаряться и выходить в атмосферу через верхний кратер микрованны. Об этом свидетельствует наличие небольшого языка пламени над каплей металла, образующегося в результате сгорания паров марганца при соприкосновении их с кислородом атмосферы в стеклянной трубке. При отсутствии в трубке кислорода, например, в случае подачи в нее аргона, язык пламени не наблюдается. На рис. 14 можно проследить изменение содержания примесей в манганине (свинца, кремния, железа) по ходу процесса для тех же проб, из которых определялись и основные элементы. Свинец и кремний в исходном металле почти отсутствуют и затем их содержание постепенно повышается, что свидетельствует о восстановлении этих элементов из компонентов стекла в металл. Примесь железа имеется в манганине и по ходу процесса его содержание остается примерно на том же уровне.

Изменение содержания никеля, хрома и марганца в высокоомном сплаве Н60ГХ аналогично изменению основных элементов в манганине. Выгорание марганца протекает интенсивно до 15-й минуты процесса, затем его содержание стабилизируется. Хром сохраняется примерно на одном и том же уровне. Относительное повышение содержания никеля обусловлено снижением содержания марганца в сплаве по ходу процесса. Кроме того, вследствие высокого содержания марганца в сплаве Н60ГХ при температуре процесса литья микропровода имеет место интенсивное восстановление кремния из стекла в металл. Так, по нашим определениям, содержание кремния в исходном сплаве Н60ГХ составило 0,4%, а уже через 5 минут оно возросло до 6,5%, а еще через 20 минут — до 7,6%. Таким образом, оба рассмотренных сплава — манганин и Н60ГХ — подвержены значительному изменению своего химического состава в процессе литья микропровода, что весьма отрицательно сказывается на стабильности его параметров.

Наиболее естественным выходом из такого положения является применение сплавов, специально разработанных для литья микропровода и не имеющих в своем составе легковыгорающих элементов. В этом случае как один из примеров нами может быть рекомендован сплав «М». График изменения содержания его основных элементов по ходу процесса представлен на рис. 15. Из приведенного графика видно, что

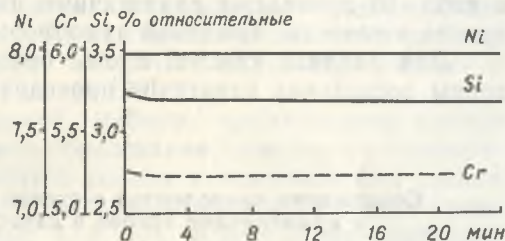


Рис. 15. Изменение содержания никеля, хрома и кремния в сплаве «М» по ходу процесса

сплав «М» вполне соответствует требованиям процесса литья микропровода, качественные показатели которого зависят от стабильности химического состава металла жилы. Анализ содержания марганца в сплаве Н60ГХ по ходу плавки с защитой сверху металла аргоном показывает, что применение защитной атмосферы снижает выгорание марганца в среднем на 12%. Однако дальнейшие исследования поведения марганца в сплаве типа манганина показали, что его выгорание зависит от содержания кислорода в металле. Например, после выдержки жидкого металла в течение 5 минут (от начала процесса) содержание кислорода в пробе без защиты аргоном было 0,0068%, а в пробе с аргоном — 0,009% и соответственно марганца — 9,4 и 7,7%.

Таким образом, применение защитной атмосферы целесообразно при условии минимального содержания кислорода в металле и стекле непосредственно. Действенным способом снижения содержания кисло-

рода (равно как и других газов) в стекле и металле является вакуумная обработка их перед употреблением в плавку.

Рассмотрим изменение химического состава стекла в процессе плавки. В табл. 9 показано содержание компонентов в стекле по ходу плавки.

Таблица 9

Содержание компонентов в стекле по ходу плавки для процесса без защитной атмосферы

№ проб	Время от начала процесса, мин	Химический состав, %										
		SiO ₂	B ₂ O ₃	PbO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Mn ₂ O ₃	Сумма
1	Исходное	72,76	14,46	5,22	1,72	0,02	0,50	0,85	1,20	3,22	0,02	99,97
2	2	71,60	15,44	4,30	2,20	0,02	0,35	0,88	1,24	3,74	0,03	99,80
3	5	71,60	15,20	4,60	2,40	0,02	0,50	0,86	1,32	3,16	0,06	99,72
4	9	71,86	15,44	4,32	2,00	0,02	0,50	0,83	1,42	3,19	0,03	99,61
5	12	72,06	15,10	4,86	2,13	0,02	0,60	0,83	1,18	3,16	0,02	99,96
6	16	72,40	15,34	4,86	2,10	0,02	0,25	0,66	1,41	3,16	0,03	100,23
7	20	71,70	15,64	4,16	2,25	0,02	0,50	1,05	1,18	3,62	0,02	100,14
8	25	73,63	14,50	4,70	1,90	0,02	0,45	1,03	1,06	3,04	0,03	100,36

ки для литья мanganинового микропровода без защитной атмосферы, а в табл. 10 приведены аналогичные данные для плавки с применением аргона в качестве защитной атмосферы.

Для анализа каждой пробы бралась стеклянная оболочка микрованны нескольких идентично проведенных плавков. Анализы выполня-

Таблица 10

Содержание компонентов в стекле по ходу плавки для процесса с применением аргона в качестве защитной атмосферы

№ проб	Время от начала процесса, мин.	Химический состав, %										
		SiO ₂	B ₂ O ₃	PbO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Mn ₂ O ₃	Сумма
1	5	71,62	14,60	4,84	1,88	0,02	0,60	1,85	1,43	3,25	0,03	100,12
2	9	73,14	13,70	5,32	1,70	0,02	0,74	1,28	1,42	3,04	0,02	100,38
3	12	72,10	14,42	4,52	2,66	0,02	0,70	1,26	1,48	2,78	0,02	99,96
4	16	72,35	14,58	5,06	1,90	0,02	0,60	1,57	1,41	2,83	0,02	100,34
5	20	73,48	14,32	4,26	2,30	0,02	0,62	1,18	1,39	2,81	0,02	100,40

лись в лаборатории технологии силикатов Киевского политехнического института.

Как известно, в процессе плавки мanganина имеет место некоторое восстановление кремния и свинца из стекла в металл (кремний восстанавливается до 1, свинец — до 0,4%). Восстановление этих элементов в

таких количествах почти не сказывается на изменении процентного содержания кремнезема и окиси свинца в стекле. Этого, очевидно, нельзя сказать в отношении сплава Н60ГХ, где восстановление кремния из стекла в металл доходит до 8%. Из табл. 9 и 10 можно сделать вывод, что химический состав стекла в процессе литья манганинового микропровода изменяется незначительно.

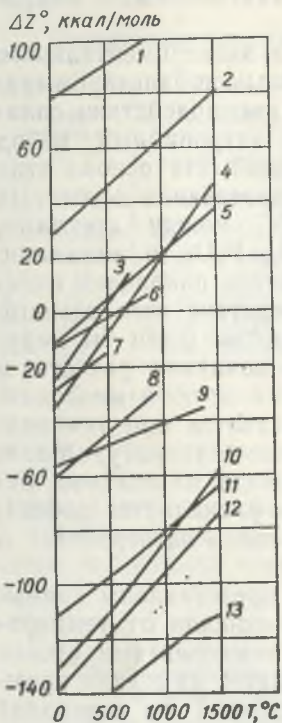
В [38] изложены результаты теоретического и экспериментального исследований изменения химического состава тройных кобальтхроммарганцевых сплавов. Для определения возможности взаимодействия сплавов и стекол в процессе литья авторы применили энтропийный метод расчета изобарных потенциалов химических реакций. На основе этих расчетов была установлена качественная картина протекания некоторых химических реакций при температурах 1200—1350°C между стеклами, содержащими SiO_2 , B_2O_3 , PbO , Na_2O , K_2O , Al_2O_3 , P_2O_5 , и сплавами, содержащими Cu , Ni , Fe , Co , Cr , Mn , Si . Температура плавления окислов компонентов этих сплавов выше 1500°C, вследствие чего твердые частицы окислов при затягивании в капилляр должны были бы нарушить формирование микропровода. Однако, как показали расчеты в [39], на основе этих окислов возможно образование двух- и многокомпонентных силикатов, большинство из которых плавится при температуре ниже 1400°C [40]. Только у силикатов алюминия температура плавления выше, вследствие чего при литье микропровода из сплавов, легированных 2% и более алюминия, металл вначале раскаляется добела, что связано с выгоранием алюминия, после чего сплав затвердевает и получить из него микропровод не удается [39].

На рис. 16, взятом из цитируемой работы, представлены кривые зависимости изобарного потенциала образования окислов от температуры при взаимодействии компонентов сплава с компонентами стекла в присутствии кислорода. Алюминий восстанавливается из стекла кремнием, марганцем и хромом (кривые 4, 9, 11). Кремний же переходит в жилу за счет его восстановления марганцем, хромом и частично кобальтом (кривые 5, 12, 13). Кривые 1 и 3 показывают, что фосфор из стекла восстанавливается всеми компонентами жилы, кроме меди. Из кривых 6—8 следует возможность восстановления свинца, натрия и калия из стекла всеми компонентами жилы, а кривая 2 показывает, что бор кобальтом не восстанавливается. Окись бора из стекла восстанавливается хромом (кривая 10), марганцем и кремнием.

В процессе литья микропровода состав кобальтхроммарганцевых сплавов изменяется за счет уменьшения содержания марганца и появления кремния, причем обеднение сплава марганцем происходит в 2—3 раза быстрее, чем обогащение кремнием [39]. Следует отметить также, что изменение содержания марганца в сплавах на медной, никелевой и кобальтовой основах мало отличается друг от друга. Легирование сплавов кремнием значительно уменьшает «выгорание» марганца.

Приведенные результаты исследования химических процессов, про-

исходящих при изготовлении микропровода, показывают, что успешное решение вопроса получения микропровода заданных параметров тесно связано с задачей стабилизации химического состава исходных материалов в процессе литья. Из рассмотренных здесь направлений, по нашему мнению, в первую очередь при решении этих вопросов следует отдать предпочтение разработке сплавов, составы которых должны выбираться с учетом специфических особенностей технологии литья микропровода.



Перейдем теперь к вопросу о содержании газов в металле в процессе литья микропровода [41]. Здесь металл в отношении взаимодействия с газами находится в самых неблагоприятных условиях. Поглощение газов может идти из атмосферы через открытый кратер микрованны и из расплавленного стекла во время его подачи в зону плавки.

Относительная металлическая площадь поглощения микрованны очень велика, что способствует практически мгновенному внедрению в металл газов при их появлении в

зоне плавки. Между тем выделение газов в рассматриваемом процессе из жидкого металла может идти только через верхний кратер расплавленной микрованны. Что же касается выделения газов из металла наружу при его кристаллизации, то этому препятствуют форма, размеры и изоляция микропровода.

Рис. 16. Зависимость изобарного потенциала образования окислов от температуры:

- 1 — $P_2O_5 + 14Cu + O_2 = 2P + 7Cu_2O$; 2 — $B_2O_3 + 5Co + O_2 = 2B + 5CoO$;
- 3 — $P_2O_5 + 7Ni + O_2 = 2P + 7NiO$; 4 — $Al_2O_3 + 10/3Cr + O_2 = 2Al + 5/3Cr_2O_3$;
- 5 — $SiO_2 + 4Co + O_2 = Si + 4CoO$; 6 — $Na_2O + 6Cu + O_2 = 2Na + 3Cu_2O$;
- 7 — $K_2O + 6Cu + O_2 = 2K + 3Cu_2O$; 8 — $PbO + 4Cu + O_2 = Pb + 2Cu_2O$;
- 9 — $Al_2O_3 + 5Mn + O_2 = 2Al + 5MnO$; 10 — $B_2O_3 + 10/3Cr + O_2 = 2B + 5/3Cr_2O_3$;
- 11 — $Al_2O_3 + 5/2Si + O_2 = 2Al + 5/2SiO_2$; 12 — $SiO_2 + 8/3Cr + O_2 = Si + 4/3Cr_2O_3$;
- 13 — $SiO_2 + 4Mn + O_2 = 4MnO + Si$

При формировании стеклянного капилляра в нем вполне вероятным является образование вакуума, что, несомненно, способствует выделению газов из металла и особенно в момент его кристаллизации в зоне вытягивания микропровода. Однако выделившиеся газы попадают фактически в замкнутое пространство — стеклянный капилляр, заполненный жилой микропровода, без какой-либо возможности свободного выхода наружу. В связи с чем результатом газовыделения может быть либо обрыв жилы микропровода, либо ее сплющивание, что в свою очередь приводит к полному нарушению процесса литья или к получению микропровода ослабленной прочностью.

Для исследования содержания газов в манганине по ходу процесса литья микропровода были отобраны соответствующие пробы металла (литники). Необходимое количество металла для определения газов обеспечивалось проведением нескольких плавок на каждую пробу при

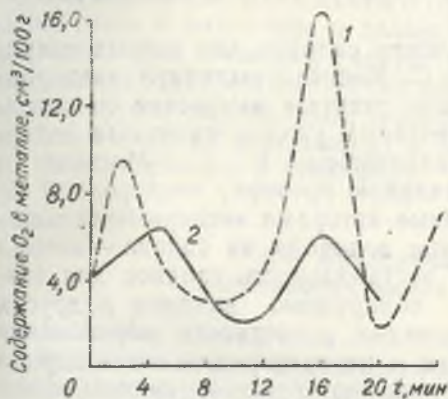


Рис. 17. Содержание кислорода в манганине по ходу плавки:

1 — при плавке металла в естественных условиях; 2 — при плавке металла в присутствии аргона

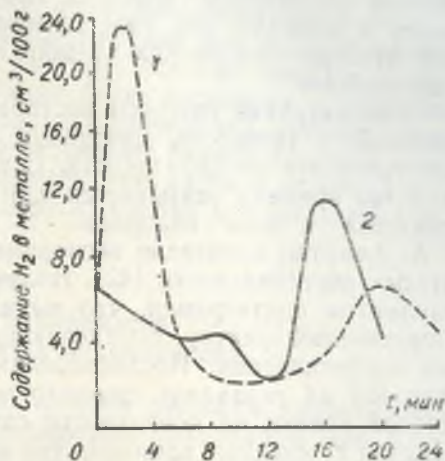
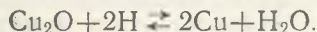


Рис. 18. Содержание водорода в манганине по ходу плавки:

1 — при плавке металла в естественных условиях; 2 — при плавке металла в присутствии аргона

идентичных условиях. Анализ газов выполнялся лабораторией газов в металлах Института электросварки им. академика Е. О. Патона АН УССР. Изменение содержания газов в металле по ходу плавки раздельно по кислороду и водороду представлено на рис. 17 и 18. Кислород в манганине находится в виде химических соединений с элементами, обладающими сродством к нему. С медью, являющейся основой сплава, он образует закись Cu_2O , которая снижает пластичность металла и охрупчивает его при изгибе. Медь с содержанием кислорода более 0,1% легко разрушается при горячей прокатке. Из закиси меди кислород может восстанавливаться водородом с образованием водяного пара:



Выделяющийся при этом водяной пар приводит к образованию микропористости в металле, а в микропроводе — к образованию пузырьков H_2O и обрыву его жилы. Установлено, что если кислород остается в металле в виде окислов, то выделяющиеся в жиле микропровода неметаллические включения оказывают отрицательное влияние на его прочностные и другие свойства.

Водород присутствует в манганине в основном в свободном состоя-

нии — в виде твердого раствора и суспензии. В период охлаждения и кристаллизации микропровода, когда растворимость газов в металле заметно снижается, водород может коагулировать и выделяться в виде пузырьков, застревающих в жиле микропровода или между нею и стеклянным капилляром. Водород, который не успевает выделиться и остается в металле, как уже упоминалось, может привести к образованию межкристаллических трещин и к обрыву жилы микропровода по этой причине.

Рассматривая причины нестабильности сплавов для точных сопротивлений, в частности, манганина, В. С. Меськин выдвинул «водородную гипотезу» нестабильности. Согласно гипотезе изменение сопротивления во времени связывается с постепенным уходом из сплава содержащегося в нем водорода. В дальнейшем В. С. Меськин и Э. А. Альфтан произвели экспериментальную проверку «водородной гипотезы» нестабильности [42]. Полученные авторами экспериментальные результаты подтвердили, что выделение водорода из сплава — весьма существенный фактор, определяющий нестабильность сплавов для точных сопротивлений. Исследованиями обнаружено влияние и других факторов на указанное свойство манганина, в частности образование окисной пленки на поверхности сплава и перераспределение водорода в сплаве с течением времени. Это еще раз подтверждает, насколько важен вопрос изучения газов в сплавах сопротивлений и разработки мер борьбы с ними.

Азот, как известно, в меди не растворяется, однако в ходе анализов в некоторых литниках он был обнаружен. Это, очевидно, следует отнести за счет легирующих примесей манганина: никеля и марганца, которые обладают способностью поглощать азот. Возможно также, что в некоторых пробах азот, выделившийся из стекла, остается в металле в виде мелких пузырьков. Так же как и водород, азот при снижении его растворимости в период охлаждения и кристаллизации металла выделяется из него в виде пузырьков с образованием газовых пор. Кроме того, азот может образовывать нитриды, представляющие собой неметаллические включения, со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Кривые изменения содержания газов в металле по ходу процесса, как это следует из приведенных рисунков, имеют пульсирующий характер. Наличие максимумов на кривых следует объяснить тем, что металл поглощает газ порциями, выделяющимися из стекла. В стекле, как известно, газы могут присутствовать в виде крупных включений (пузырей) и, чаще всего, мелких с диаметром пузырька до 0,8 мм; это так называемые «мошки», получающиеся вследствие плохого осветления стекла при варке. Кроме того, при повторном нагревании стекла в процессе литья в нем могут возникать вторичные пузырьки — результат соответствующих реакций с выделением газов. При нагревании стеклянной трубки до температуры выше точки размягчения отдельные газовые пузырьки и «мошка» коагулируют (сливаются) и в определенные моменты прорываются в зону плавки отдельными порциями. Когда

такого насыщения нет, металл может терять часть газов через открытый кратер микрованны. Этим, очевидно, объясняются минимумы на кривых изменения содержания газов по ходу плавки. Сравнительно резкие колебания содержания газов в металле можно объяснить его малым объемом и относительно большой площадью взаимодействия.

Как видно из рис. 17 и 18 применение аргона для защиты микрованны (только со стороны открытого кратера) заметно снижает содержание газов в манганине и делает кривые более плавными, с меньшим выбросом. Это, очевидно, следует объяснить снижением интенсивности поглощения газов металлом, так как в результате подачи аргона в стеклянную трубку парциальное давление кислорода, азота и водорода над металлом сводится к минимуму и создаются условия для выделения газов непосредственно в атмосферу.

§ 3. Предельные возможности капельного способа литья микропровода

Основным показателем капельного способа является длительность процесса литья между отдельными дозаплавками микрованны [43]. Основным параметрам микропровода из сплавов сопротивления следует отнести среднее погонное сопротивление и общее сопротивление отрезка микропровода на bobине. Микропровод из проводниковых материалов можно характеризовать средним диаметром жилы и длиной отрезка микропровода на bobине.

Рассмотрим пределы капельного способа по длительности процесса литья, общему сопротивлению и длине отрезка микропровода на bobине. Пусть t — теоретически возможная продолжительность процесса литья, мин; P — вес металла или сплава в микрованне, г; ρ — удельное сопротивление сплава или металла, $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$; γ — удельный вес сплава или металла, г/см³; v — скорость литья, м/мин; R — общее сопротивление отрезка микропровода на bobине, Мом; L — длина отрезка микропровода на bobине, м; r — погонное сопротивление микропровода, ком/м; S — площадь поперечного сечения жилы микропровода, мм²; d — диаметр жилы микропровода, мм. Допустим, что из всего сплава, находящегося в микрованне, удалось изготовить отрезок микропровода, тогда

$$P = tvS\gamma \quad (1.3.1)$$

Из известного соотношения можно записать

$$S = \frac{P}{r} \quad (1.3.2)$$

Подставляя (1.3.2) в (1.3.1) и решая относительно t , находим

$$t = \frac{P}{\rho \gamma v} r \quad (1.3.3)$$

с микропроводом в изоляции из стекла № 17. ТКС рассчитывали по формуле

$$d = \frac{R_{80} - R_{20}}{R_{20}(80 - 20)}, \text{ 1/град.}$$

Для микропроводов из сплавов сопротивления оказалось, что наибольшее количество микропровода — 31,5% от выработанного из сплава Н60ГХ — имеет ТКС, лежащий в пределах $\pm 5 \cdot 10^{-5}$, 1/град (табл. 12). Для сплава Н63ГХ наиболее вероятный ТКС находится в интервале $\pm 3 \cdot 10^{-5}$ 1/град.

Таблица 12

ТКС микропроводов из сплавов Н60ГХ и Н63ГХ

ТКС · 10 ⁵ , 1/град	Количество, %		ТКС · 10 ⁵ , 1/град	Количество, %	
	Н60ГХ	Н63ГХ		Н60ГХ	Н63ГХ
От 0,0 до ± 1,0	7,0	24,0	от 3,0 до ± 5,0	31,5	14,0
От 1,0 до ± 2,0	8,8	31,0	от 5,0 до ± 7,0	28,2	—
От 2,0 до ± 3,0	15,0	31,0	свыше ± 7,0	9,5	—

Расчет средних значений рассмотренных параметров микропровода произведен по формуле

$$\bar{a} = \frac{\sum_1^n a_i R_i}{\sum_1^n R_i} \quad (1.3.7)$$

или

$$\bar{a} = \frac{\sum_1^k n_i a_i}{\sum_1^k n_i}, \quad (1.3.8)$$

где a — среднее значение параметра, a_i — значение параметра, R_i — количество микропровода в мегомах с параметром a , n_i — число бобин с параметром a . По формуле (1.3.7) рассчитаны \bar{a} и \bar{r} , а по (1.3.8) — \bar{R} и $\left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}}\right)$. Полученные графики распределения позволили установить, что дифференциальная плотность распределения \bar{r} , R и

$\frac{r_{\max}}{r_{\min}}$ удовлетворительно описывается уравнением Пуассона (частный случай распределения «хи-квадрат»):

$$\varphi(x) = \frac{1}{a} 4xe^{-2x}, \quad (1.3.9)$$

где

$$x = \frac{a_l}{a}.$$

Интегральная функция распределения рассмотренных параметров может быть записана в виде

$$P(x) = 1 - e^{-2x}(1 + 2x). \quad (1.3.10)$$

Средние значения \bar{r} и \bar{R} и распределение микропровода по r и R являются достаточно устойчивыми параметрами, характеризующими количественно в целом весь процесс производства микропровода.

Таблица 13

Стекло	Параметры			
	\bar{r} , ком/м	R , Мом	$\frac{r_{\max}}{r_{\min}}$	$\times 10^{-5}$ · град $^{-1}$
№ 17	25,0	20,0	1,3	-2,6
ЗС-11	31,5	33,0	1,4	-

Анализ показывает, что по ТКС выпуск микропровода с некоторым приближением распределяется по нормальному закону. Следовательно, среднеквадратичное отклонение можно определить по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^k (a_i - \bar{a})^2 n_i}{n}}. \quad (1.3.11)$$

Коэффициент асимметрии кривой распределения найден из соотношения

$$\Sigma_k = \frac{\sum_1^k (a_i - \bar{a})^3 n_i}{n\sigma^3}. \quad (1.3.12)$$

Определено, что для марганцевого микропровода $\sigma = 2,1 \cdot 10^{-5}$, $\Sigma_k = 1,8$. Распределение микропровода из сплава Н60ГХ по температурному коэффициенту сопротивления характеризуется $\bar{a}_{20-100} = 4,2 \times$

$\times 10^{-5}$ 1/град, среднеквадратичным отклонением $\sigma = 2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/град и коэффициентом асимметрии $\Sigma_k = +0,5$; для микропровода из сплава Н63ГХ соответственно $\bar{a}_{20-100} = 1,8 \cdot 10^{-5}$ 1/град, $\sigma = 1,3 \cdot 10^{-5}$ 1/град и $\Sigma_k = -0,9$.

Технологичность режима можно характеризовать длительностью процесса $\tau_{\text{п}}$ между заплавками микропечи, сплавом и длительностью наладки после заплавки $\tau_{\text{н}}$. Эти параметры определяются путем экспериментально-статистических исследований процесса литья микропровода.

Установлено, что при литье микропровода из сплава Н60ГХ $\tau_{\text{п}} = (4,5 \pm 2,5)$ мин, $\tau_{\text{н}} = (9 \pm 2)$ мин, процесс литья из сплава Н63ГХ характеризуется $\tau_{\text{п}} = (5 \pm 2,5)$ мин и $\tau_{\text{н}} = (10 \pm 3)$ мин.

Обычно производительность установок литья микропровода учитывается в Мом в смену. При анализе четырех контрольных установок на протяжении 8000 часов работы установлено, что среднечасовая производительность установки П, определенная по формуле из [38] при работе на стекле ЗС-11, равна 98 Мом/час, а на стекле № 17 — 46 Мом/час.

Полагая, что распределение подчиняется нормальному закону, согласно (1.3.11) определено, что среднеквадратичное отклонение для ЗС-11 $\sigma_{\text{п}} = 22$ Мом/час, для № 17 — $\sigma_{\text{п}} = 25$ Мом/час.

Следует отметить, что если производительность установки в заводских условиях может до некоторой степени служить мерой учета, то для оценки экономических показателей процесса литья эта величина недостаточна. Более полно отражает экономику процесса коэффициент использования машинного времени установки, которое определяется как отношение продолжительности процесса литья $\tau_{\text{пр}}$ к длительности работы установки $\tau_{\text{у}}$. По формулам (1.3.8) и (1.3.11) определено, что коэффициент использования машинного времени установки не зависит практически от сорта применяемого стекла и равен $0,22 \pm 0,08$. Сравнение полученных данных с результатами статистического анализа промышленного производства литых микропроводов из сплавов сопротивления приведено в табл. 14.

Таблица 14

Среднестатистическая и предельная длительность капельного способа при литье микропровода из сплавов сопротивления

Показатель	Манганин		Н60ГХ	
	среднестатистическая	предельная при Р=1-2Г	среднестатистическая	предельная при Р=1-2Г
Длительность процесса между заплавками, мин	4,5	30—60	4,5	20—40
Общее сопротивление отрезка микропровода на бобине, Мом . .	20	150—300	45	400—800

Из табл. 14 видно, что практически возможные пределы капельного процесса при литье микропровода из сплавов сопротивления в настоящее время не достигаются. По-видимому, это связано с неоднородностью стеклянной трубки по длине, отсутствием стабилизации технологического режима литья и др. Реализация резервов капельного способа литья позволит улучшить технико-экономические показатели процесса литья и снизить себестоимость микропровода.

Отметим, что к снижению предельных возможностей капельного способа может привести стремление путем подбора технологического режима обеспечить получение микропровода с широким диапазоном погонного сопротивления из сплава с одним и тем же удельным сопротивлением. Так, для марганцевого микропровода в соответствии с техническими условиями установлено шесть групп микропровода с погонным сопротивлением от 2 до 150 ком/м. В табл. 15 и 16 пред-

Таблица 15

ТКР микропроводов из сплавов сопротивления

Микропровод	D, мм	d, мм	k	$\beta \cdot 10^{-6}$ град ⁻¹	
				20 — 100°С	20 — 200°С
МЛСН-60	19	13,0	1,4	8,2	8,0
	17	9,0	1,9	6,8	6,7
	20	9,5	2,4	5,4	5,6
Марганцевый	16	10,0	1,6	11,8	11,7
	16	8,5	1,9	9,6	9,8
	13	4,0	3,2	7,0	7,0
ИЛСН-80	15	10,0	1,5	13,0	13,4
	16	8,0	2,0	10,2	10,3
	20	5,0	4,0	6,5	6,5
Медный	14	7,0	2,0	6,5	6,5
	25	9,0	2,8	6,5	6,5
	40	12,0	3,3	6,1	6,1

ставлены расчетные данные предельных возможностей капельного способа в зависимости от удельного сопротивления используемого сплава. Учитывая, что удельный вес сплавов сопротивления в основном лежит в пределах от 7,5 до 9,5 г/см³, при расчете берется $\gamma=9$ г/см³.

Из приведенных данных вытекает, что с уменьшением удельного сопротивления сплава увеличиваются пределы капельного способа литья. Однако отсюда не следует делать выводы о том, что для улучшения качественных показателей капельного способа нужно стремиться к освоению сплавов с низким удельным сопротивлением, так как для микропроводов из таких сплавов с увеличением погонного сопротивления

Изменение коэффициента тензочувствительности микропровода из никельхромкремниевго сплава в зависимости от температуры [46]

t, °C	10	100	200	300	400
S	2,29	2,20	2,20	2,18	2,14

уменьшается диаметр жилы, а это снижает их технологичность при изготовлении изделий и может также снижать надежность последних.

Таким образом, при установлении пределов по погонному сопротивлению следует учитывать возможные пределы по общему сопротивлению отрезка микропровода и длительности процесса литья, технологичность микропровода при изготовлении изделий, в частности, прецизионных сопротивлений и удовлетворение требованиям, обеспечивающим надежность изделий. Поэтому следует разрабатывать прецизионные сплавы с широким диапазоном по удельному сопротивлению с целью более эффективного использования возможностей капельного способа.

Для капельного способа литья микропровода из проводниковых материалов, по аналогии с изложенным выше, можно вывести, что

$$L = \frac{P}{0,785 d^2 \gamma}, \quad (1.3.13)$$

$$t = \frac{P}{0,785 d^2 \gamma v}. \quad (1.3.14)$$

Как видно из (1.3.13) и (1.3.14), для проводниковых материалов пределы капельного способа возрастают при увеличении P и уменьшении d . Условия, принятые при литье из сплавов сопротивления, для медного микропровода можно записать

$$L = 0,142 P/d^2, \quad (1.3.15)$$

$$t = 0,0007 P/d^2. \quad (1.3.16)$$

Рассчитанные по (1.3.15) и (1.3.16) пределы капельного способа при литье медного микропровода позволяют считать, что литье микропровода из проводниковых материалов диаметром менее 15 мкм следует вести капельным способом, если вес металла в микрованне не меньше 2,5 г. Для литья микропровода с диаметром до 50 мкм вес металла необходимо увеличить до 4—5 г, что может вызвать некоторые трудности при ведении технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Vollstone* (um 1800). *J. B. nach V. Angerer-Ebert: Technische kunstgriffe die physikalischen Untersuchungen*. 13. Aufl. Braunschweig: Vieweg-Verlag, 1964, 122.
2. *В. А. Шпирнов*. Фонтанирование жидкого металла. М., ВНИИТИ, 59—484/48, 1959.
3. *G. Tamman* и *G. Moritz: Z. Metallkde.* 27, 1935, 114/15.
4. *S. B. Pand*, Dt. Anlesgeschr. 1205, 234, vom 18, 11, 1965.
5. *Эрхард Герман*. Непрерывное литье. М., Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1961.
6. *В. Шварцмаер*. Непрерывная разливка. Перевод с немецкого инж. А. И. Миллера. М., Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1959.
7. *G. F. Taylor*. A Method of drawing metallig filaments and a diskussion of their properties and uses. *Physical Review*, 23, 1924, 655—660.
8. *G. F. Taylor*. Process and aparatus for making Filaments. Filed Jan. 1928 Patented Feb. 24, 1931. United States Patent Offic, 1, 793, 529.
9. Литейная форма — жидкий расплав. «Изобретатель и рационализатор», 1961, № 2.
10. *В. З. Шуб* Способ получения микропровода в стеклянной изоляции. Авторское свидетельство СССР № 172 003, класс СОЗ6; 32а, 23⁰⁴.
11. Микрометаллургия и микротехнология. Под общей редакцией проф. Б. А. Остроумова, ЦБТИ Ленинградского СНХ, 1959.
12. *А. В. Улитовский, И. М. Маянский, А. И. Авраменко*. Способ непрерывного изготовления микропровода в стеклянной изоляции. Авторское свидетельство СССР № 128 427, класс 7, зависимое от авт. свид. № 85 998. Приоритет от 3.IX 1950.
13. *А. В. Улитовский, Н. М. Аверин*. Способ изготовления металлической микропровода. Авторское свидетельство СССР № 161 325, класс В 21с, 7в, 2⁰¹.
14. *В. Г. Красиньков, Л. В. Рейман, В. В. Трояновский*. Способ изготовления литых проводов в сплошной стеклянной изоляции. Авторское свидетельство СССР, № 149 138, классы: Н 01в, 21с, 7⁰¹.
15. *Н. Р. Берман, В. И. Заборовский* [и др.]. Способ производства микропровода в стеклянной изоляции. Авторское свидетельство СССР, № 192 880, класс 21с, 7⁰¹.
16. *В. И. Заборовский, Е. Я. Бадинтер, Я. П. Борисов* [и др.]. Способ производства литого микропровода из сплавов в стеклянной изоляции № 237 941, класс 21с, 7⁰¹.
17. *В. И. Заборовский, В. К. Коробов, В. Г. Красиньков*. Способ производства литого микропровода из сплавов металлов в стеклянной изоляции. Франция, патент № 34 465.
18. *В. И. Заборовский, В. К. Коробов, В. Г. Красиньков*. Способ производства литого микропровода из сплавов металлов в стеклянной изоляции. Италия, патент 23 № 24 301.
19. *В. И. Заборовский, В. К. Коробов, В. Г. Красиньков*. Способ производства литого микропровода из сплавов металлов в стеклянной изоляции. Швеция, патент № 10 942/65.
20. *В. И. Заборовский, В. К. Коробов, В. Г. Красиньков*. Способ производства литого микропровода из сплавов металлов в стеклянной изоляции. Швейцария, патент № 11 227/65.
21. *В. И. Заборовский, В. И. Коробов, В. Г. Красиньков*. Способ производства литого микропровода из сплавов металлов в стеклянной изоляции. Япония, патент № 44-26083.
22. *В. И. Заборовский, В. И. Коробов, В. Г. Красиньков*. Способ производства литого микропровода из сплавов металлов в стеклянной изоляции. Австрия, патент № 237 857.
23. *В. И. Заборовский, В. И. Коробов, В. Г. Красиньков*. Способ производства литого микропровода из сплавов металлов в стеклянной изоляции. Англия, патент № 1, 120, 247.

24. H. B. Whitehurst, W. P. Warthen. Forming continuons ferbe of mineral material, e. g. glass having metallic or vibreous core. США, патент № 3 077 091.
25. Mc. Kenica W. S. Method of preparing fine metal wres. США, патент № 321 480 805.
26. Dr. Walter Danñühl. Verfahren zum Herstellen schr dünner Drühte aus Metallen und Metallegerungen, ФРГ, патент № 977 307.
27. Хоси Цунзо, Сэкигуби Такэси. Сева Дэнси кабусики кайся. Способ получения микропровода со стеклянной изоляцией. Япония, патент № 9902.
28. Мацуда Йосио, Цукада Хидэтакэ (сумитома дэнки кочё кабусика кайся). Способ изготовления тонкого провода со стеклянной изоляцией. Япония, патент № 13 054.
29. Ю. С. Ляликов, И. В. Аронина. Фазовый анализ медных микровани и микропроводов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 6. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1969, 144—149.
30. В. П. Матвеев. О процессе получения микропровода в стеклянной изоляции непосредственно из жидкого металла. Достижения в области разработки, производства и применения микропровода в стеклянной изоляции. М., ЦНИИТИ Электропром, 1962.
31. Simposium sur le contact du verre. Shaud avec le metal. Scheveningen, 26—29 mai, 1964 Compte Rendu. Перевод № 539 ОПНТИ. Новосибирск, 1968.
32. И. М. Касаткина. О спае стекла с металлом. Электронная техника, серия Радиокомпоненты, вып. 1, 1967, 3—12.
33. Научно-технический отчет НИИИМ по теме 08—64. М., 1965.
34. Н. Е. Фадеева, И. Я. Карасик, А. М. Фирсов, Э. А. Альфтан. Электронномикроскопические исследования структуры микропровода с жилой из сплавов сопротивления. Электронная техника, серия 9, Радиокомпоненты, вып. 1, 1967, 89—95.
35. В. З. Шуб, В. И. Лукьянов. Некоторые особенности изготовления тончайших металлических нитей из никельхромовых расплавов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 62—71.
36. Поверхностные явления в расплавах и процессы порошковой металлургии. Изд. АН УССР. Киев, 1963.
37. В. В. Аверин, П. А. Черкасов, А. И. Самарин. Раскисление никельхромовых расплавов. Труды Института металлургии им. А. А. Байкова, XI, 1962, 49—64.
38. Е. Я. Бадинтер, В. Т. Брага, М. А. Вейцман. Об изменении химического состава исходных материалов в процессе литья микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 102—108.
39. Л. Г. Афонина, Э. А. Альфтан. Изменение химического состава сплавов при литье микропроводов. Электронная техника, серия Радиокомпоненты, вып. 1, 1967, 12—20.
40. В. Эйтель. Физическая химия силикатов. М., ИЛ, 1962.
41. Е. Я. Бадинтер, В. Т. Брага, А. М. Марютин. Содержание газов в металле в процессе литья манганинового микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. III. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965, 56—61.
42. В. С. Меськин, Э. А. Альфтан. О причинах нестабильности сплавов для точных сопротивлений и путях ее уменьшения. Физика металлов и металловедение, 10, вып. I, 1960, 31—40.
43. Е. Я. Бадинтер, А. М. Марютин. Статистический анализ промышленного производства литого манганинового микропровода в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. I. Кишинев, «Штиинца», 1962, 12—23.
44. А. А. Фозель, И. А. Павлов [и др.]. Индукторы для нагрева и плавки металлов во взвешенном состоянии. Изв. АН СССР ОТН, Металлургия и топливо, 1961, № 5.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ИНДУКТОР—КАПЛЯ

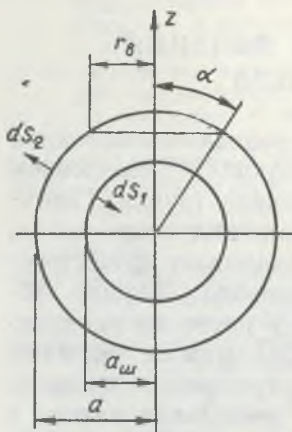
Основная особенность изготовления микропровода — взвешенная плавка металла токами высокой частоты с последующим заполнением капилляра, вытягиваемого из размягченной стеклянной трубки. Поэтому электродинамическое взаимодействие в системе индуктор—капля, определяющее температуру и форму расплава, оказывает существенное влияние на весь ход процесса литья микропровода. Полный теоретический анализ этого взаимодействия встречает почти непреодолимые математические трудности, что связано со сложными формами применяемых индукторов. Однако рассмотрение упрощенных моделей, в частности, поведения шара в поле одного или нескольких витков с током позволяет с качественной стороны раскрыть специфические явления в этой системе и получить некоторые их количественные оценки, дающие хорошее совпадение с экспериментом. При этом создается возможность приблизительно рассчитать форму жидкой капли металла и изучить гидродинамические аспекты процесса получения микропровода.

В системе индуктор—капля излучение высокочастотного индуктора взаимодействует с индуцированным излучением капли. Поэтому колебания напряженности поля индуктора вызывают колебания поля металлического ядра и при определенных условиях в капле может возникнуть автоколебательный процесс. Особенность его состоит в том, что металлическое ядро находится в вязкой стеклянной оболочке, вследствие чего получается колебательная система с демпфированием, которое приводит к большому отбору энергии от металлического ядра и препятствует его выливанию из индуктора. Динамический режим микролитья в капилляр, вызывающий изменение массы системы, выводит ее из автоколебательного режима.

Отмеченные особенности поведения стекла и металла на докристаллизационной стадии формирования микропровода определили выбор рассмотренных ниже задач.

§ 1. Электродинамическое взаимодействие в системе индуктор—капля

На первом этапе эту задачу можно рассматривать как квазистационарное приближение задачи о дифракции на шаре излучения витка с током. Ниже приводим решение этой задачи, принадлежащее А. А. Фомину [1].



Рассмотрим шар с удельной проводимостью σ , диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной восприимчивостью μ , находящийся в среде, параметры которой $\sigma=0$, $\epsilon=\mu=1$. Через центр шара проходит ось витка с током радиуса r_0 , а сферическая система координат с началом в центре шара введена таким образом, что ось z лежит в плоскости, параллельной плоскости витка (рис. 19).

При решении поставленной задачи использовалась калибровка, при которой скалярный

Рис. 19. Шар в поле витка с током

потенциал равен нулю. Кроме того, считается, что размеры шара значительно меньше размеров витка и искажения поля витка с током из-за наличия загрузки незначительны. Соответствующие решения для индуцированного поля внутри шара и вне его, полученные в [1], имеют вид

$$\vec{A}^w(\vec{r}) = -\vec{a}_\varphi \frac{2\pi}{ca_w} \cdot I_0 r_0 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l+1}{l(l+1)} \times \frac{P_l^1(\cos \alpha) P_l^1(\cos \theta) j_l(k_w r) h_l(ka)}{ka_w j_l(k_w a_w) h_l'(ka_w) - k_w a_w j_l'(k_w a_w) h_l(ka_w)}, \quad (2.1.1)$$

$$\vec{A}^p(\vec{r}) = a_\varphi \frac{2\pi i}{c} k I_0 r_0 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l+1}{l(l+1)} P_l^1(\cos \alpha) P_l^1(\cos \theta) \times h_l(ka) h_l(kr) \frac{k_w a_w j_l(ka_w) j_l'(k_w a_w) - ka_w j_l(k_w a_w) j_l'(ka_w)}{ka_w j_l(k_w a_w) h_l'(ka_w) - k_w a_w j_l'(k_w a_w) h_l(ka_w)}. \quad (2.1.2)$$

Здесь $\vec{A}^w(\vec{r})$ и $\vec{A}^p(\vec{r})$ — векторный потенциал внутри шара и вне его соответственно, a — радиус сферы, на которой лежит виток с током, $k = \frac{\omega}{c}$ — волновое число вне шара, а k_w — волновое число внутри него

$$k_w = k \sqrt{\left(\varepsilon + i \frac{4\pi\sigma}{\omega}\right) \mu},$$

P_l^n — функции Лежандра, а j_n и h_l — сферические бesselовы и ганкел-левы функции, c — скорость света в вакууме, α — широтный угол витка с током, \vec{a}_φ — орт азимута, I_0 — амплитудное значение вектора тока, индекс l принимает значения от 0 до ∞ , а штрих — дифференцирование по аргументу. В случае ярко выраженного поверхностного эффекта в нагрузке приведенные соотношения в [1] преобразованы к виду

$$\begin{aligned} \vec{A}_w(\vec{r}) = & \vec{a}_\varphi \frac{\pi}{ca} I_0 r_B \gamma \frac{1}{r} (1+i) \exp\left\{(1-i) \frac{r-a_w}{\gamma}\right\} \times \\ & \times \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l+1}{l(l+1)} \left(\frac{a_w}{a}\right)^l P_l^1(\cos \alpha) P_l^1(\cos \theta), \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

$$\vec{A}^p(\vec{r}) = -\vec{a}_\varphi \frac{2\pi}{ca} I_0 r_B \sum_{l=1}^{\infty} \frac{P_l^1(\cos \alpha) P_l^1(\cos \theta)}{l(l+1)} \left(\frac{a_w}{a}\right)^l \left(\frac{a_w}{r}\right)^{l+1}, \quad (2.1.4)$$

$$\vec{A}^B(\vec{r}) = \vec{a}_\varphi \frac{2\pi}{ca} I_0 r_B \sum_{l=1}^{\infty} \frac{P_l^1(\cos \alpha) P_l^1(\cos \theta)}{l(l+1)} \cdot \left. \begin{array}{l} \left(\frac{a}{r}\right)^{l+1} \\ \left(\frac{r}{a}\right)^l \end{array} \right\} \begin{array}{l} r > a, \\ r < a. \end{array} \quad (2.1.5)$$

Здесь $\gamma = \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma\omega}}$ — глубина проникновения. Полученные результаты позволяют перейти к вычислению входных параметров системы виток — шар и сил, действующих на шар. В частности [1], для входных параметров системы на основе комплексной теоремы Умова—Пойнтинга получены такие выражения:

$$R_w = -X_w = \frac{2\pi^2}{c} k \gamma \left(\frac{r_B}{a}\right)^2 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l+1}{l(l+1)} \left(\frac{a_w}{a}\right)^{2l} \{P_l^1(\cos \alpha)\}^2, \quad (2.1.6)$$

$$R_{Bx} = R_B + R_w, \quad (2.1.7)$$

$$X_{Bx} = X_w - 4\pi^2\omega \left(\frac{r_B}{ca}\right)^2 a \sum_{l=1}^{\infty} \frac{[P_l^1(\cos \alpha)]^2}{l(l+1)} \left\{1 - \left(\frac{a_w}{a}\right)^{2l+1}\right\}. \quad (2.1.8)$$

Плотность пондеромоторных сил определяется из соотношения

$$\vec{f} = \frac{1}{c} [\vec{j} \times \vec{H}] = \frac{\sigma}{c} [\vec{E} \times \vec{H}] = \frac{\sigma}{c} [E_{\varphi} H_r \vec{a}_{\theta} - E_{\varphi} H_{\theta} \vec{a}_r] = \vec{f}_{\theta} + \vec{f}_r, \quad (2.1.9)$$

где \vec{j} — вектор плотности тока, \vec{a}_{θ} и \vec{a}_r — широтный и радиальный орты, нижний индекс дает соответствующие компоненты векторов поля. В принятом приближении составляющие векторов поля в шаре равны

$$H_r = \frac{V\sqrt{2}\pi}{ca} I_0 r_B \gamma \frac{1}{r^2} \varphi_1 \exp \left\{ \frac{r-a_{ш}}{\gamma} - i \left[\frac{r-a_{ш}}{\gamma} - \frac{\pi}{4} + \omega t \right] \right\}, \quad (2.1.10)$$

$$H_{\theta} = -\frac{2\pi}{ca} I_0 r_B \frac{1}{r} \varphi_0 \exp \left\{ \frac{r-a_{ш}}{\gamma} - i \left[\frac{r-a_{ш}}{\gamma} + \omega t \right] \right\}, \quad (2.1.11)$$

$$E_{\varphi} = \frac{V\sqrt{2}\pi}{ca} k \gamma I_0 r_B \frac{1}{r} \varphi_0 \exp \left\{ \frac{r-a_{ш}}{\gamma} - i \left[\frac{r-a_{ш}}{\gamma} - \frac{3}{4} \pi + \omega t \right] \right\}. \quad (2.1.12)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\varphi_0 = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l+1}{l(l+1)} \left(\frac{a_{ш}}{a} \right)^l P_l^1(\cos \alpha) P_l^1(\cos \theta), \quad (2.1.13)$$

$$\varphi_1 = \sum_{l=1}^{\infty} (2l+1) \left(\frac{a_{ш}}{a} \right)^l P_l^1(\cos \alpha) P_l^1(\cos \theta). \quad (2.1.14)$$

Способ вычисления рядов для φ_0 и φ_1 рассмотрен в [1]. Там же приведены графики для этих сумм и оценены погрешности замены бесконечных рядов конечными. Приведем еще выражение для поддерживающей силы:

$$\vec{F}_z = -a_z \frac{2\pi^2}{c} \sigma k \gamma^2 \left(\frac{I_0 r_B}{ca} \right)^2 \sum_{l=1}^{\infty} P_l^1(\cos \alpha) \times \left[\frac{1}{l+1} \left(\frac{a_{ш}}{a} \right)^{2l+1} \cdot P_{l+1}^1(\cos \alpha) + \frac{1}{l} \left(\frac{a_{ш}}{a} \right)^{2l-1} P_{l-1}^1(\cos \alpha) \right]. \quad (2.1.15)$$

Здесь учтено, что $\vec{a}_r \cos \theta = \vec{a}_z$.

Перейдем к определению мощности, выделяющейся на шаре. Выражение для вектора Умова—Пойнтинга отличается от выражения для плотности пондеромоторных сил только постоянным множителем: в соотношении (2.1.9) необходимо заменить $\left(\frac{\sigma}{c} \right)$ на $\left(\frac{c}{4\pi} \right)$. Аналогичная

замена в (2.1.15) приводит к выражению для среднего за период значения вектора Умова—Пойнтинга.

Задача о шаре в поле системы витков с током рассмотрена в [3]. При этом изучался также случай сильного проявления поверхностного эффекта. Обобщение этих задач для любой степени проявления поверхностного эффекта в нагрузке показано в [4], где получены формулы для средних за период результирующих пондеромоторных сил, действующих на немагнитный проводящий шар, и мощности, передаваемой в шар.

$$F = \frac{2\pi^3 k_1 \gamma^2}{c^3} \sum_{n,q} I_n I_q (nq) k_1 \left(\alpha_n, \alpha_q, \frac{a_{\text{ш}}}{r_{\text{в}n}}, \frac{a_{\text{ш}}}{r_{\text{в}q}}, m \right), \quad (2.1.16)$$

$$P = \frac{\pi^2 k_2 \gamma^2}{2c^2} \sum_{n,q} I_n I_q (nq) k_2 \left(\alpha_n, \alpha_q, \frac{a_{\text{ш}}}{r_{\text{в}n}}, \frac{a_{\text{ш}}}{r_{\text{в}q}}, m \right), \quad (2.1.17)$$

где f —частота тока, I_n, I_q —амплитуды тока в витках n и q ,

$nq = \begin{cases} 1 & \text{— при согласованном направлении токов в витках,} \\ -1 & \text{— при встречном направлении токов,} \end{cases}$

α_n, α_q —широтные углы витков, $r_{\text{в}n}, r_{\text{в}q}$ —радиусы витков, $m = \frac{a_{\text{ш}} \sqrt{2}}{\gamma}$,

k_1, k_2 —коэффициенты, зависящие от геометрических размеров системы и параметра m :

$$k_1 \left(\alpha_n, \alpha_q, \frac{a_{\text{ш}}}{r_{\text{в}n}}, \frac{a_{\text{ш}}}{r_{\text{в}q}}, m \right) = \sin \alpha_n \sin \alpha_q \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{l+1} P_l^1(\cos \alpha_n) \times \\ \times P_{l+1}^1(\cos \alpha_q) \left(\frac{a_{\text{ш}}}{r_{\text{в}n}} \sin \alpha_n \right)^l \left(\frac{a_{\text{ш}}}{r_{\text{в}q}} \sin \alpha_q \right)^{l+1} k_{11}, \quad (2.1.18)$$

$$k_2 \left(\alpha_n, \alpha_q, \frac{a_{\text{ш}}}{r_{\text{в}n}}, \frac{a_{\text{ш}}}{r_{\text{в}q}}, m \right) = \sin \alpha_n \sin \alpha_q \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{l(l+1)} P_l^1(\cos \alpha_n) \times \\ \times P_l^1(\cos \alpha_q) \left(\frac{a_{\text{ш}}}{r_{\text{в}n}} \sin \alpha_n \right)^l \left(\frac{a_{\text{ш}}}{r_{\text{в}q}} \sin \alpha_q \right)^l k_{12}. \quad (2.1.19)$$

Коэффициенты k_{11} и k_{12} выражаются через функции Томсона:

$$k_{11} = - \frac{\text{ber}_{l+1,5} m \text{ber}_{l-0,5} m + \text{bei}_{l+1,5} m \text{bei}_{l-0,5} m}{\text{ber}_{l-0,5}^2 m + \text{bei}_{l-0,5}^2 m}, \quad (2.1.20)$$

$$k_{12} = \frac{\text{ber}_{l+1,5} m \text{bei}_{l-0,5} m - \text{bei}_{l+1,5} m \text{ber}_{l-0,5} m}{\text{ber}_{l-0,5}^2 m + \text{bei}_{l-0,5}^2 m}, \quad (2.1.21)$$

где ber , m , bei , m — функции Томсона. Для значений ν от 0,5 до 10,5; ν и m от 1 до 14 с единичным интервалом эти функции протабулированы в [4].

При ярко выраженном скин-эффекте $m \gg 1$, и в этом случае согласно [4]

$$k_{11} \approx 1, k_{12} \approx \frac{2l+1}{m\sqrt{2}}. \quad (2.1.22)$$

Расчет пондеромоторных сил по обобщенным формулам, произведенный в [4], для алюминиевого шара диаметром 60 мм, помещенного между двумя витками с равными токами встречного направления, при частоте в 2,5 кГц и амплитудном токе порядка 7000 а расходится с экспериментальными данными, полученными А. А. Фоминым, не более чем на 10%.

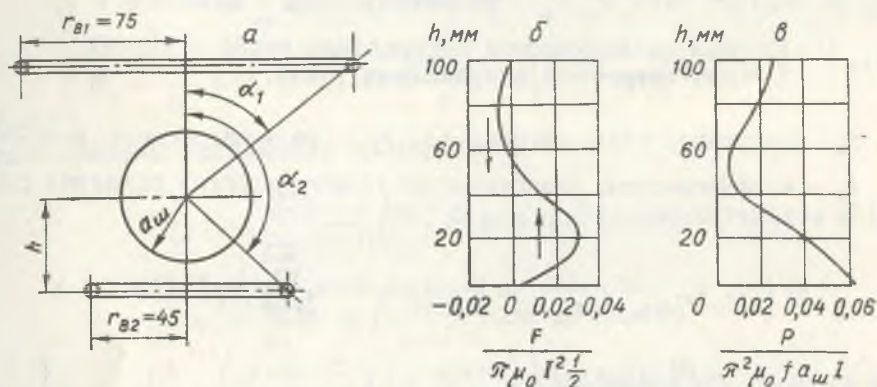


Рис. 20. Зависимость результирующей пондеромоторных сил и мощности, нагревающей шар, от его положения в двухвитковом индукторе

На рис. 20, заимствованном из [4], приведено изменение результирующей пондеромоторных сил и мощности, нагревающей шар, в зависимости от положения шара в двухвитковом индукторе.

§ 2. Критическая масса при литье микропровода

Рассмотренные силы обуславливают прежде всего так называемый выталкивающий эффект [5, 6], суть его в следующем. При достаточно высокой частоте тока, когда наблюдается сильный скин-эффект, металл почти полностью выталкивает поле из занимаемого им пространства. Силовое взаимодействие вихревых токов в шаре (капле металла) с магнитным полем индуктора приводит к тому, что масса металла вы-

талкивается в зону с меньшей плотностью поля. Если силы тяжести недостаточно для преодоления выталкивающих сил, то капля металла будет удерживаться в свободно парящем состоянии [6].

Для дальнейшего анализа удобно переписать предыдущие соотношения в терминах компонент поля. Для этого вводим амплитудное значение Θ — компоненты магнитной напряженности

$$H_{\Theta}^A = H_0 = \frac{2\pi}{ca} I_0 r_{\text{в}} \frac{1}{r} \varphi_0. \quad (2.2.1)$$

Напомним, что (2.2.1) описывает поведение H_0 только для $k_{\text{ш}} r \gg 1$, при $k_{\text{ш}} r \ll 1$ имеем $H_0 \sim r$. Для $\frac{a_{\text{ш}}}{a} \leq 0,8$ сумма ряда φ_0 практически слабо зависит от Θ . Кроме того, при сильном скин-эффекте можно считать, что H_0 не меняется с изменением r на величину порядка глубины проникновения. В силу сказанного для упрощения расчетов допустимо положить H_0 постоянным и равным его значению на поверхности шара. Такое допущение, вообще говоря, соответствует случаю плоской волны, оно реализуется тем точнее, чем лучше выполнено неравенство $a_{\text{ш}} \ll a$. С учетом (2.2.1) соотношение (2.1.11) переписывается в виде

$$H_{\Theta} = H_0 \exp \left\{ \frac{r-a_{\text{ш}}}{\gamma} - i \left[\frac{r-a_{\text{ш}}}{\gamma} + \omega t \right] \right\}. \quad (2.2.2)$$

Принимая во внимание написанную формулу, среднее за период значение плотности ponderomotorных сил можно представить так:

$$\vec{f}_{\text{cp}} = \vec{f}_{r_{\text{cp}}} = -\vec{a}_r \frac{\sigma}{4c} k_{\gamma} H_0^2 \exp \left(2 \frac{r-a_{\text{ш}}}{\gamma} \right). \quad (2.2.3)$$

Объемная плотность \vec{f}_{cp} на поверхности шара равна своему амплитудному значению и быстро убывает внутри шара. Как отмечается в [6], ponderomotorные силы создают внутри металла электромагнитное давление, аналогичное гидростатическому. В рассматриваемой модели это давление равно

$$\vec{\sigma}_{\text{эм}} = \vec{f}_{\text{cp}} \cos \Theta = -\vec{a}_z \cos \Theta \frac{\sigma}{4c} k_{\gamma} H_0^2 \exp \left(2 \frac{r-a_{\text{ш}}}{\gamma} \right). \quad (2.2.4)$$

В этом случае электромагнитное давление существенно зависит от глубины проникновения. На внутренней границе слоя жидкого металла, толщина которого практически равна глубине проникновения, давление достигает своего максимального значения (которое мало отличается от величины σ_{∞}):

$$\sigma_{\infty} = 2 \int_{\text{ш} \cos \Theta}^0 \sigma_{\text{эм}} dz. \quad (2.2.5)$$

Вычисление интеграла с точностью до членов порядка $\exp\left(-2\frac{a_m}{\gamma}\right)$ дает

$$\sigma_{\infty} = -2 \int_0^{a_m \cos \Theta} \frac{\sigma}{4c} k \gamma H_0^2 \exp\left(2\frac{r-a_m}{\gamma}\right) dz = \frac{\sigma}{4c} k \gamma^2 H_0^2 \cos^2 \Theta. \quad (2.2.6)$$

Подставляя $k = \frac{\omega}{c}$ и $\gamma^2 = \frac{c}{2\pi\tau\omega}$, получим

$$\sigma_{\infty} = \frac{H_0^2}{8\pi} \cos \Theta. \quad (2.2.6, a)$$

Это электромагнитное давление представляет собой силу, поддерживающую столб металла высотой h с экваториальной площадью сечения, равной единице. Пренебрегая искривлениями на краях этого столба, условие его равновесия можно записать в виде

$$\sigma_{\infty} = \rho h = \frac{H_0^2}{8\pi} \cos \Theta, \quad (2.2.7)$$

где ρ — удельный вес металла. Отметим, что условие (2.2.7) является необходимым, но не достаточным для свободного парения массы металла. Дело в том, что электромагнитное давление (2.2.5) только поддерживает столб металла, но не препятствует его деформациям в горизонтальной плоскости. Из (2.2.4) следует, что величина электромагнитного давления σ_{∞} достигает максимума на вертикальной оси ($\Theta = 0$) и равна нулю при $\Theta = \frac{\pi}{2}$, т. е. на экваторе шара. Поддерживающая сила (2.2.7) состоит из двух составляющих, равных по величине, но качественно различных. Силы, действующие на нижнюю половину шара, направлены к экватору и являются как бы опорными, в то же время силы, действующие на верхнюю половину шара, направлены от экватора и, в некотором смысле, растягивают столбик металла. В связи с этим свободно парящий шарик должен при достижении определенных размеров деформироваться и принимать сфероидальную форму. В зависимости от веса металла этот сфероид будет либо сплюснутым, либо вытянутым. Неоднородность силового поля и неравномерность нагрева металла обуславливают происходящую в нем циркуляцию. При этом из-за отсутствия поддерживающих сил на экваториальной поверхности шара слои металла отсюда будут свободно стекать вниз, что и наблюдалось Р. П. Жежериним в [6].

С рассмотренными поддерживающими силами связан так называемый выталкивающий эффект при индукционной плавке металла. Кроме него в системе индуктор—капля наблюдается и сжимающий эффект, результатом которого является, как известно, калибровка жидкой струи металла, вытекающего из индуктора. В принятом приближе-

нии найдем сжимающие силы на единицу длины поля, проектируя $\vec{f}_{ср}$ на плоскость, параллельную плоскости витка с током

$$|\vec{f}_{сж}| = \frac{\sigma}{4c} k \gamma H_0^2 \sin \Theta \exp\left(2\frac{r-a_{ш}}{\gamma}\right). \quad (2.2.8)$$

Аналогично предыдущему получим, что суммарная сжимающая сила, действующая на некоторое горизонтальное сечение расплавленной капли металла, равна

$$\sigma_{сж} = \frac{\sigma}{4c} k \gamma^2 H_0^2 \sin \Theta = \frac{H_0^2}{8\pi} \sin \Theta. \quad (2.2.9)$$

Угол Θ дает широтный угол внешнего контура сечения. В отличие от $\vec{\sigma}_{эм}$ сила $f_{сж}$ всегда направлена к центру шара. Легко видеть, что $\sigma_{сж}$ достигает максимума на экваторе парящей капли и равна нулю на вертикальной оси. Для того чтобы парящий столб металла не деформировался в горизонтальной плоскости, необходимо, чтобы гидростатическое давление в исследуемом сечении равнялось сжимающим силам электромагнитного поля, т. е. условие равновесия можно представить еще дополнительным равенством

$$\rho h = \frac{H_0^2}{8\pi} \sin \Theta. \quad (2.2.10)$$

Кроме того, на любой радиальный столбик металла высотой $a_{ш}$ действует направленная к центру шара результирующая электромагнитная сила

$$F_{эм} = \frac{\sigma}{8c} k \gamma^2 H_0^2 = \frac{H_0^2}{16\pi}, \quad (2.2.11)$$

препятствующая деформациям шара в радиальном направлении. Силы (2.2.6а) и (2.2.10) — обычные разложения $2F_{эм}$, действующей в приповерхностном слое на вертикальную и горизонтальную составляющие, что, впрочем, вполне очевидно.

Проведенный анализ показывает, что парящий металл оказывает заключенным в силовую оболочку из электромагнитных сил, действующих в поверхностном слое [6]. Прочность такой оболочки в значительной степени зависит от положения массы металла в «электромагнитном тигле», конфигурации поля и многих других факторов. Качество такого электромагнитного тигля подробно рассмотрено в [6—14].

В [6, 7] отмечается, что на поверхности жидкого металла имеются особые точки или особые линии, где индуктированные вихревые токи всегда равны нулю, вследствие чего в этих местах отсутствует взаимодействие магнитного поля индуктора с металлом. Так, на свободной поверхности проводника, топологически эквивалентного шару, имеется,

по крайней мере, одна такая особая точка [7]. В этих точках или линиях создается возможность вытекания металла через образующиеся «дыры» или «щели» силовой оболочки. Вместе с тем эта возможность реализуется лишь в том случае, если неэлектромагнитных сил, в частности сил поверхностного натяжения, недостаточно для сохранения целостности формы электромагнитного тигля. Эксперименты, проведенные в [7], показывают, что вытекание металла из электромагнитного тигля может происходить не обязательно в особых точках, когда на поверхности расплава возникают возмущения, размер которых меньше размера скин-слоя (глубины проникновения). Естественно, что если возникшие возмущения становятся достаточно большими, то они подавляются магнитным полем. Однако решающую роль в затухании возмущений поверхности расплава играют силы лапласовского давления, которые быстро растут с уменьшением радиуса кривизны поверхности. Это наглядно иллюстрируется экспериментом, описанным в [7]. Помещенный внутри индуктора твердый шарик совершает случайные колебания, но при расплавлении он моментально успокаивается. Блуждание твердого шарика связано со случайными возмущениями, а его успокоение вызвано силами вязкого трения внутри расплава.

В конкретных условиях литья микропровода наиболее «слабым» местом электромагнитного тигля является нижняя часть взвешенной капли. Это связано с тем, что особые точки на поверхности парящего металла находятся прежде всего в нижней части массы расплава и еще с тем, что радиус кривизны здесь, в области так называемого вторичного конуса, достаточно велик [15]. При определенном весе жидкого металла и достаточно большом перегреве он начинает пульсировать между двумя устойчивыми формами равновесия: верхним — без шейки и нижним — с шейкой [7, 12]. Наличие вязкого трения внутри металла и особенно между металлом и стеклом приводит к прекращению пульсаций, и капля в динамическом режиме, т. е. при вытягивании микропровода, принимает вторую устойчивую форму равновесия. Образующаяся при этом шейка деформируется под действием сил вытягивания и преобразовывается таким образом во вторичный конус. Исходная геометрия шейки является определяющей в формировании геометрии микропровода. Как показывает эксперимент, тот факт, что капля принимает вторую форму равновесия, вызван прежде всего динамическими причинами, а именно силами, связанными с вытягиванием микропровода. Поэтому вторичный конус в условиях литья микропровода уже с самого начала является возмущением второй формы устойчивого равновесия, и, следовательно, в значительной степени его поверхность неустойчива: малые случайные возмущения (колебания электрических режимов индуктора, неоднородность поступающей во вторичный конус массы металла и стекла, пульсации сил вытягивания и т. д.) вызовут колебания жидкого металла со слабым затуханием. При этом наличие обратной связи между парящим металлом и электрической цепью индуктора может привести к автоколебательному

процессу, что будет причиной возникновения неустойчивости парения [16] и самого процесса микролитья в капилляр.

Неустойчивость парения жидкого металла приводит к образованию на его поверхности «складок», направленных вдоль линий поля. Величина этих складок соизмерима с глубиной проникновения и почти прозрачна для поля индуктора. При определенных условиях металл может выдавливаться через эти складки и выливаться вдоль них. Критические условия складкообразования были получены Р. П. Жежериным [6] из условия соизмеримости изменения магнитной энергии в приповерхностном слое (скин—слое) с работой сил поверхностного натяжения.

Будем считать, что в пределах скин—слоя плотность электромагнитной энергии падает от максимального значения на поверхности металла до нуля на расстоянии, равном глубине проникновения. При достаточно малой толщине скин—слоя это изменение можно считать линейным. В этом случае возникновение складки приводит к изменению запаса электромагнитной энергии

$$dW = \frac{H_0^2}{8\pi} \cdot \frac{\gamma}{2} dx dy. \quad (2.2.12)$$

Деформация поверхности связана с работой dA против сил поверхностного натяжения:

$$dA = \alpha dx dy. \quad (2.2.13)$$

Приравнявая dA и dW , получаем условие того, что на поверхности металла не будет образовываться складок, через которые жидкость проваливается:

$$\alpha \geq \frac{H_0^2}{16\pi} \gamma. \quad (2.2.14)$$

Учитывая (2.2.6), находим критическую высоту столба металла, который не будет проваливаться в индукторе:

$$h_{кр}' = \frac{2\alpha}{\rho \gamma} \cos \theta. \quad (2.2.15)$$

Вводя капиллярную постоянную

$$b = \sqrt{\frac{2\alpha}{\rho}}, \quad (2.2.16)$$

перепишем выражение для $h_{кр}'$ в виде

$$h_{кр}' = \frac{b^2}{\gamma} \cos \theta. \quad (2.2.17)$$

Аналогично из (2.2.10) найдем $h_{кр}''$ — высоту столбика металла, на поверхности которого не будут образовываться горизонтальные складки:

$$h_{кр}'' = \frac{b^2}{\gamma} \sin \theta. \quad (2.2.18)$$

Наконец, для взвешенного шара складки радиального направления отсутствуют при условии

$$h_{кр} = \frac{b^2}{\gamma}, \quad (2.2.19)$$

что совпадает с соответствующим соотношением из [6] для плоской задачи. Все это может служить ориентиром при определении допустимых размеров парящей массы расплава. Легко видеть, что

$$h_{кр}'|_{\theta=0} = h_{кр}''|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = h_{кр} = 2a_{ш}, \quad (2.2.20)$$

отсюда находим предельно допустимый радиус шара, в котором отсутствуют складки. Он выражается соотношением

$$a_{ш} = \frac{b^2}{2\gamma}. \quad (2.2.21)$$

Остановимся на приведенных в [6] ограничениях, накладываемых на допустимую высоту парящей в электромагнитном индукторе массы расплава. Соотношение (2.2.21) дает максимальное значение для радиуса устойчиво парящего шара. При этом из (2.2.14) определяется критическое значение напряженности поля H_k

$$H_k = 4 \sqrt{\frac{\pi x}{\gamma}}. \quad (2.2.14, a)$$

Напряженность же $H_{п.}$, обусловленная заданной колебательной мощностью, ограничена и падает с ростом частоты. Кроме того, если размеры парящей массы меньше глубины проникновения, то она прозрачна для поля и силы ее взаимодействия с полем недостаточно для взвешивания. Следовательно, жидкий металл будет парить в поле индуктора, если его высота лежит в пределах критического треугольника со сторонами h_k , h_{Δ} и $h_{п.}$, представленного рис. 21 [6], там же дана зависимость H_k и $H_{п.}$ от частоты.

Более общее рассмотрение вопроса об устойчивости тяжелой проводящей жидкости в поле индуктора дано в [8], где для плоской задачи получен критерий устойчивости возмущений, длина волны которых меньше толщины скин-слоя:

$$\frac{h}{\sqrt{2} \gamma} \left(\frac{x}{k_y} \right)^2 + \frac{2k_y}{\rho} > 1, \quad (2.2.22)$$

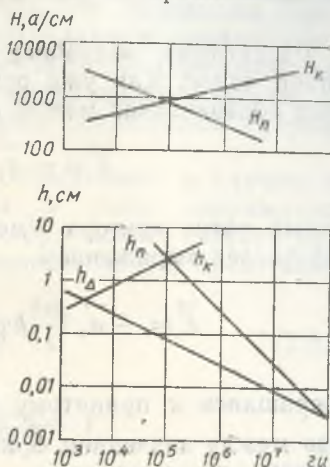
где κ — волновое число накладываемого быстропеременного магнитного поля, $k_y - y$ — компонента волнового вектора возмущения. Минимизация левой части приводит к неравенству

$$2,9 \frac{h\kappa^2 \sigma}{\gamma\rho} > 1. \quad (2.2.23)$$

Неравенства (2.2.22) и (2.2.23) являются обобщением (2.2.19), которое вытекает из (2.2.22) как критерий того, что при создании устойчивости магнитные силы преобладают над силами поверхностного натяжения [8]. В общем случае вес металла, $H, \text{а/см}$ удерживаемого в индукторе во взвешенном состоянии, определяется его физическими свойствами, взаимной топологией проводника и потенциальной ямы индуктора и мощностью, передаваемой в металл. Этот вес [9] выражается зависимостью

$$F_{\text{кр}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma}{\pi f}} A \cdot P_s \cdot S, \quad (2.2.24)$$

Рис. 21. Критический треугольник, определяющий допустимые высоты столбика жидкого металла, который может быть взвешен в электромагнитном поле индуктора. Наверху показана зависимость H_k и H_n от частоты



где $F_{\text{кр}}$ — критический вес висящего металла в н; P_s — передаваемая в металл общая мощность, отнесенная к единице поверхности в вт/м^2 ; S — площадь поверхности металла в м^2 ; A — безразмерный коэффициент, зависящий от взаимной топологии поля индуктора и проводника; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума в гн/м ; σ — удельная проводимость металла в $\text{ом}^{-1} \text{м}^{-1}$; f — частота поля в гц. В [9], кроме того, приведена зависимость минимальной частоты электромагнитного поля, способного удержать жидкий металл во взвешенном состоянии:

$$f_{\text{min}} = \frac{h^2}{\pi \sigma \mu_0 b^4}, \quad (2.2.25)$$

где h и b взяты в метрах.

Практически удается поддерживать во взвешенном состоянии только такой вес металла, который определяется его капиллярной постоянной (см. табл.) [11].

Отметим еще, что для шара в поле витка с током приведенные зависимости могут быть конкретизированы, исходя из выражения для F_z по формуле (2.1.31). Применение этого соотношения не внесет существенных изменений в проведенный анализ, но усложнит выкладки.

Таблица

Металл	Pb	Cu	Fe	Al	Si	Ti
Капиллярная постоянная, см	0,27	0,52	0,56	0,63	0,79	0,82
Масса, г	0,6	3,0	3,5	1,6	2,7	6,0
Диаметр капли, мм	4,5	8,5	9,2	9,2	13,0	13,5

Рассмотрим подробнее вопрос о мощности, выделяемой во взвешенной капле. Как уже отмечалось, вектор Умова—Пойнтинга в принятых обозначениях можно представить в виде

$$\vec{S} = -\vec{a}_r \frac{c}{16\pi} k\gamma H_0^2 \exp\left(2\frac{r-a_m}{\gamma}\right). \quad (2.2.26)$$

Полный поток вектора Умова—Пойнтинга через поверхность шара представлен выражением

$$\vec{E} = -\vec{a}_r \frac{2\pi^2}{c} k\gamma \left(\frac{r_b}{a}\right)^2 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l+1}{l(l+1)} \left(\frac{a_m}{a}\right)^{2l} |P_l^1(\cos \alpha)|^2. \quad (2.2.27)$$

Возвращаясь к принятому приближению плоской волны, установим связь между значением \vec{S} на поверхности металла и радиальным электромагнитным давлением:

$$\vec{S} = \omega \gamma \vec{F}_{эм}. \quad (2.2.28)$$

Наиболее простой вид приобретает это соотношение в том случае, когда радиус шара равен критическому. Ему соответствует максимальная мощность нагрева

$$\vec{S} = 2\omega\alpha. \quad (2.2.29)$$

В более общем случае в [11] мощность, подводимая к расплавляемому металлу, разделяется на две части: мощность P_1 , связанную с силами, уравнивающими вес металла, и P_2 , связанную с взаиморавновешивающимися силами. При этом

$$P_1 = A\rho V \sqrt{\frac{F}{\sigma}}, \quad (2.2.30)$$

где V —объем расплава, A —коэффициент, зависящий от формы индуктора и расплава.

Мощность P_2 определяется положением расплава относительно потенциальной ямы индуктора. При увеличении тока в индукторе (мощности, подводимой к индуктору) расплав поднимается в зону поля другой конфигурации, вследствие чего выделяемая в металле мощность не только не увеличивается, но может даже уменьшиться. Таким образом, увеличение тока в индукторе приводит к снижению его к.п.д. В пределе мощности, подводимая к металлу, стремится к значению, определяемому (2.2.30). Следовательно, энергетически наиболее выгоден такой режим литья микропровода, при котором масса заплавленного металла равна критической. Заметим еще, что стеклянная трубка хотя и оказывает тормозящее действие вертикальным перемещениям металла, но оно достаточно мало по сравнению с электромагнитными силами. При переходе капли в область меньшей напряженности она как бы плавает над полем и принимает форму сплюснутого сфероида [6, 11].

Приведем еще некоторые результаты, относящиеся к случаю достаточно большого диаметра витка с током и резко выраженного скин-эффекта, когда поле внутри индуктора можно считать однородным. Тогда мощность, поглощаемая половиной шара, представится соотношением

$$P = \frac{3\pi}{4} H_0^2 \frac{a_{ш}^2}{\sigma} k_p(m_k), \quad (2.2.31)$$

где

$$k_p(m_k) = m_k \frac{\operatorname{sh}(2m_k) + \sin(2m_k)}{\operatorname{ch}(2m_k) - \cos(2m_k)} - 1, \quad (2.2.32)$$

$$m_k = \frac{a_{ш}}{2\gamma}.$$

При этом полная поддерживающая сила равна

$$F_z = \frac{9\pi}{128} H_0^2 \mu_0 a_{ш}^2 k_f(m_k), \quad (2.2.33)$$

$$k_f(m_k) = 1 - \frac{Ei(2m_k) + Ei(-2m_k) - 2Ci(2m_k)}{\operatorname{ch}(2m_k) - \cos(2m_k)}, \quad (2.2.34)$$

где $Ei(x)$ — интегральная показательная функция, $Ci(x)$ — интегральный косинус. Асимптотика коэффициентов k_p и k_f , дающих частотные зависимости силы и мощности в шаре, прозрачна и согласно [19] определяется выражениями

$$\text{при } m_k \rightarrow 0 \quad k_f(m_k) \rightarrow \frac{4}{135} m_k^4, \quad (2.2.35)$$

$$k_p(m_k) \rightarrow \frac{4}{45} m_k^4,$$

$$\text{при } m_k \rightarrow \infty \quad k_f(m_k) \rightarrow 1, \quad (2.2.36)$$

$$k_p(m_k) \rightarrow m_k.$$

§ 3. Экспериментальные исследования системы индуктор—капля

Перейдем к анализу результатов экспериментальных исследований электромагнитного взаимодействия индуктор—расплав и его влияния на процесс микролитья в капилляр. К сожалению, непосредственные измерения на капле представляют большие трудности, из-за чего достаточно надежные результаты в этой области пока отсутствуют. Однако есть основания считать, что использование метода моделирования в электролитической ванне позволяет не только качественно воссоздать реальную картину, но и получить для нее некоторые приемлемые количественные оценки. Такое моделирование было недавно осуществлено [17] в плексигласовой ванне с обычной водопроводной водой в качестве электролита, изучалось электрическое поле системы индуктор—капля

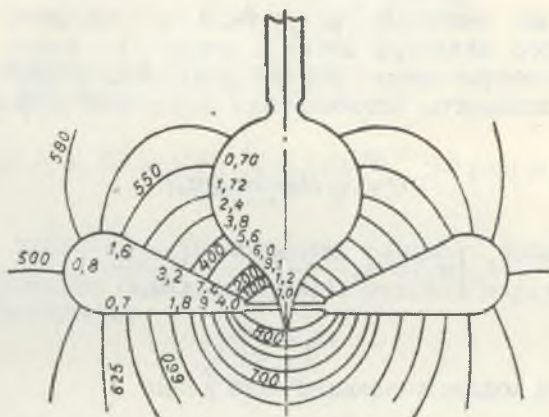


Рис. 22. Электрическое поле системы индуктор—капля, полученное моделированием в электролитической ванне

на определенном образом выбранных моделях, соответствующих медным каплям весом в 3,5—7 г для трех режимов изготовления медных микропроводов. Характерная картина электрического поля для одной из моделей приведена на рис. 22, где линии отображают эквипотенциальные поверхности электрического поля в плоскости сечения модели. Эквипотенциальные линии снимались на стандартной мостовой схеме, в которой индикатором минимума тока в диагонали моста является осциллограф СН-1. При уравновешенном мосте, когда ток, проходящий через помещенный в ванну зонд, отсутствует, напряжение на зажимах генератора пропорционально величине образцового сопротивления в одном из плеч моста, оно (с точностью до постоянного множителя) равно потенциалу точки, в которую помещен зонд. Напряжен-

ность магнитного поля в свою очередь пропорциональна градиенту потенциала. В соответствии с этим цифры у эквипотенциальных линий рис. 22 указывают значения потенциалов поля, измеренные по величине выставленного образцового сопротивления, а цифры у поверхности капли и индуктора дают значения градиента потенциала на границе между моделями и электролитом или же, иначе говоря, относительное значение напряженности магнитного поля.

Проведенные эксперименты выявили относительно сильную зависимость напряженности магнитного поля на поверхности капли от положения рассматриваемой точки поверхности относительно индуктора (рис. 23). В нижней части капли, в точках, лежащих на уровне кристал-

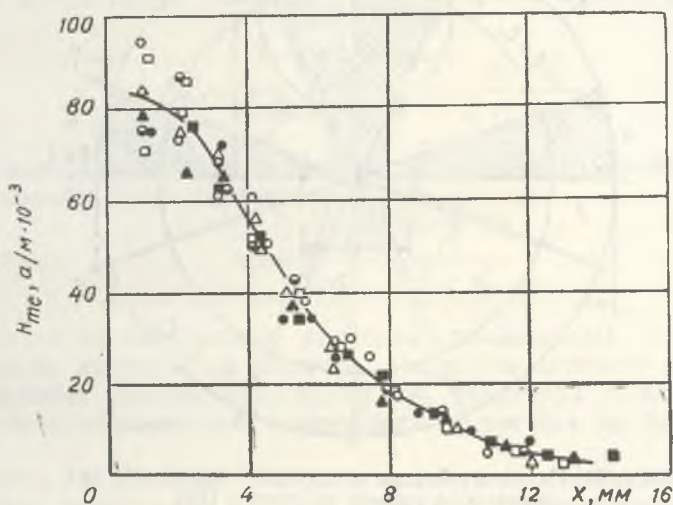


Рис. 23. Зависимость напряженности магнитного поля на поверхности капли от положения рассматриваемой точки относительно индуктора. Одинаковые значки — экспериментальные точки, относящиеся к одной модели

лизатора и нижнего среза индуктора, напряженность магнитного поля достигает своего максимального значения порядка $8 \cdot 10^4$ а/м. Однако уже на уровне верхнего среза индуктора она уменьшается в 2 раза, а на расстоянии 10 мм от кристаллизатора — в 10 раз [18]. Отметим, что в зоне индуктора картина изменения напряженности поля определенным образом повторяет форму капли, что, вообще говоря, характерно для взвешенной проводящей жидкости в поле высокой частоты при малой величине скин-слоя.

Рассмотренные в работе [18] формы моделей индуктора и расплавленной капли легли в основу приближенного аналитического рас-

чета индуктора для литья микропровода [19]. В этом методе формы индуктора и капли аппроксимируются участками координатных поверхностей сплюснутой сфероидальной системы координат ξ , η и φ , причем поверхность индуктора заменяется поверхностью фигуры, ограниченной однополостным гиперboloидом $\eta = \eta_n$, сфероидом $\xi = \xi_n$ и плоскостью $z = 0$, а поверхность капли ограничена поверхностями гиперboloида $\eta = \eta_k$ и двух сфероидов $\xi = \xi_k$ и $\xi = 0$ (рис. 24) [19]. При этом система индуктор—капля разбивается на четыре области,

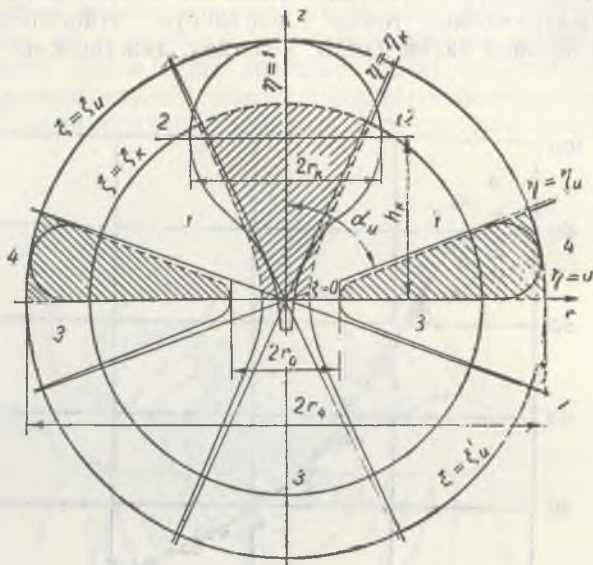


Рис. 24. Исходные формы индуктора и капли при аналитическом расчете системы в [19]

указанные на рисунке. Используя ряд приемлемых допущений, таких как независимость поля верхней и нижней относительно плоскости $z = 0$ частей системы, пренебрежение краевыми эффектами в окрестностях угловых точек и т. д., можно рассчитать интересующие нас величины для каждой из указанных областей. В частности, для активной мощности, поглощаемой каплей при высоких частотах [18], получено

$$P_{в.ч.} = \frac{\Phi^2}{4\pi^2\sigma\mu_0^2\gamma(\eta_k - \eta_n)^2} \ln \frac{\sqrt{\xi_k^2 + \eta_k^2} + \xi_k \sqrt{1 - \eta_k^2}}{\sqrt{\xi_k^2 + \eta_k^2} - \xi_k \sqrt{1 - \eta_k^2}}, \quad (2.3.1)$$

где Φ — магнитный поток индуктора; индексы k и n относят соответствующие величины к капле или индуктору:

$$\eta_{\text{к}} = \sqrt{1 - \frac{r_{\text{к}}^2}{2(r_{\text{к}}^2 + h_{\text{к}}^2)}}, \quad (2.3.2)$$

$$\xi_{\text{к}} = \frac{\sqrt{h_{\text{к}}^2 + r_{\text{к}}^2}}{a}, \quad (2.3.3)$$

$$\eta_{\text{и}} = \cos \alpha_{\text{и}}, \quad (2.3.4)$$

$$a = \frac{r_0}{\sin \alpha_{\text{и}}}, \quad (2.3.5)$$

$\alpha_{\text{и}}$ — угол конусности рабочей поверхности индуктора, $r_{\text{к}}$ — радиус капли на уровне экватора, $h_{\text{к}}$ — высота капли, измеренная от плоскости $z=0$ до плоскости экватора. Поддерживающая сила в этом случае равна

$$F_{\text{вч}} = \frac{\Phi}{8\pi a^2 \mu_0 (\eta_{\text{к}} - \eta_{\text{и}})^2} \ln \frac{\eta_{\text{к}}^2 + \xi_{\text{к}}^2}{\eta_{\text{к}}^2 (1 + \xi_{\text{к}}^2)}. \quad (2.3.6)$$

Согласовывая расчетные данные с экспериментальными, необходимо в соотношении (2.3.6) положить

$$\eta_{\text{к}} = \sqrt{1 - \frac{r_{\text{к}}^2}{r_{\text{к}}^2 + h_{\text{к}}^2}}. \quad (2.3.2, \text{а})$$

Широкая экспериментальная проверка приведенных результатов на специальных моделях, на которых измерялось активное и индуктивное сопротивления пустого и загруженного индуктора, показали, что погрешность приближенного аналитического расчета не превышает 12% [19, 20].

Другое направление экспериментальных исследований — это выяснение роли критической массы в процессе литья микропровода. Наиболее легко критическая масса обнаруживает себя в явлении так называемого «сброса», которое обычно наблюдается при следующих обстоятельствах. В последний период наладки процесса литья, после того как достаточно долго вытягивался пустой стеклянный капилляр, включается подача кристаллизующей жидкости. Это приводит к тому, что перемещения в слое стекла начинают непосредственно передаваться в металл.

Теперь в течение некоторого времени вытягивается уже микропровод, но с жилой, имеющей частые и достаточно длинные разрывы сплошности. Именно в этот период в микропроводе образуются утолщения, представляющие собой покрытую тонкой стеклянной оболочкой металлическую жилу, в виде разного рода возмущений эллипсоидальных форм, наибольший поперечный размер которых примерно на два порядка превышает обычный диаметр жилы микропровода. Ме-

талл внутри таких утолщений отличается ярким свечением, свидетельствующим о его высокой температуре, а также о том, что указанные утолщения являются не успевающими охладиться оторванными кусками капли. После одного или нескольких таких «сбросов» кончается период наладки и начинается нормальный процесс микролитья.

Рассмотренное явление можно объяснить так. При загрузке металла в индуктор его масса, как правило, превышает критическую. Однако наличие стеклянной оболочки препятствует образованию складок на поверхности расплава и гасит возникающие на ней возмущения. Кроме того, силы поверхностного натяжения стекла и вязкого сопротивления движению в стекле закрывают имеющиеся «щели» и «дыры» в электромагнитной силовой оболочке расплава. Вследствие этого избыточное давление более или менее равномерно распределяется по всей площади контакта между стеклом и металлом, это приводит к отсутствию заметных локальных деформаций стеклянной оболочки и не дает металлу выливаться из индуктора. Положение металлического расплава в индукторе будет устойчивым, его поверхность имеет лишь одну форму устойчивого равновесия, близкую к сферической.

В период наладки процесса литья микропровода в нижней части расплава начинает создаваться отверстие в силовой оболочке, причем по мере утоньшения слоя стекла в этой зоне периметр силового отверстия растет. Кроме того, в этой области на стекло и металл начинают действовать дополнительные увлекающие силы, связанные с силой вытягивания. Это приводит, с одной стороны, к тому, что расплав устремляется в образовавшееся отверстие и металл поступает больше, чем может принять капилляр. В связи с этим капилляр как бы раздувается, создавая тем самым возможность увеличения расхода металла. Но скорости частиц металла еще достаточно малы для преодоления силы поверхностного натяжения и проникновения в капилляр. Поэтому пустой капилляр вытягивается еще некоторое время, после того как частицы расплава приобретут направленное поступательное движение. С другой стороны, нарушение силовой оболочки и появление дополнительных увлекающих сил позволяют поверхности расплава начать переход во вторую форму устойчивого равновесия. При переливании расплава из одной формы равновесия в другую он наталкивается на преграду в виде стеклянной оболочки, что приводит к возникновению колебаний формы поверхности расплава и стеклянной оболочки, причем стекло и металл колеблются в противофазе. При этом возникновение и рост силового отверстия как бы выступают в качестве внешней возбуждающей силы. Вследствие указанных причин рассмотренный процесс колебаний до конца формирования силового отверстия будет автоколебательным. По мере роста амплитуды колебаний скорость отдельных малых объемов металла становится достаточной для их проникновения в капилляр, что приводит к образованию микропровода с периодически повторяющимися разрывами жилы. Колебания формы поверхности расплава при визуальном на-

блюденни оставляют впечатление того, что капля как бы «дышит», пульсируя в стеклянной оболочке.

С нарастанием автоколебательного процесса форма поверхности расплава в своем крайнем нижнем положении все больше приближается ко второй форме устойчивого равновесия, образуя так называемый вторичный конус растягивания. В силу того что в этот период приток металла превышает его расход, вторичный конус растягивания будет неустойчивым, его размеры и масса растут. Наконец, вес его делается настолько большим, что сил поверхностного натяжения станет недостаточно для его удержания внутри колеблющегося расплава. Тогда в момент перехода основной массы расплава в первую форму равновесия произойдет своеобразный отрыв вторичного конуса растягивания и его унос вместе с капилляром.

Отметим, что после окончательного установления размеров и формы силового отверстия и стабилизации сил вытягивания автоколебания формы поверхности капли прекращаются и колебательный процесс становится быстрозатухающим. Поэтому происходит всего лишь один или несколько отрывов вторичного конуса растягивания, после чего устанавливается динамическое равновесие.

Таким образом, физическая сторона последнего периода наладки процесса литья микропровода заключается в переводе капли из первой формы устойчивого равновесия, характерного для статического режима индукционного нагрева металла в стеклянной оболочке, во вторую форму устойчивого равновесия, отличающего динамический режим изготовления микропровода, причем этот переход совершается через посредство автоколебательного процесса, перерастающего в свободные колебания формы поверхности расплава с большим затуханием. Тогда явление «сброса» состоит в отрыве вторичного конуса растягивания от капли, масса которой превышает критическую, а появляющиеся в начальный период литья утолщения представляют собой не что иное, как уносимый вторичный конус растягивания. При этом окончание периода «сбросов» означает начало нормального процесса изготовления микропровода.

Число отрывов вторичного конуса растягивания, их частота, геометрия утолщений определяются условиями литья микропровода, такими, как скорость вытягивания, физико-химические параметры стекла и металла, температура капли, режим генератора и т. д. В зависимости от этих условий после установления устойчивого квазистационарного процесса микролитья масса капли может сделаться меньшей или равной критической, но может и остаться больше ее.

Приведенный анализ не исчерпывает многостороннего процесса наладки и такого сложного явления, как «сброс» в начальный период литья микропровода. Однако он может служить исходным пунктом для получения ряда количественных оценок, важных в технологическом отношении.

Рассмотрим далее вопрос о влиянии массы заплавленного металла

на параметры получаемого микропровода. В работе [21] показано, что с ростом массы капли погонное сопротивление микропровода меняется по закону, близкому к параболическому. Из рис. 25 видно, что, не смотря на рост температуры капли, кривая зависимости погонного сопротивления от заплавленной массы имеет ниспадающую ветвь. При

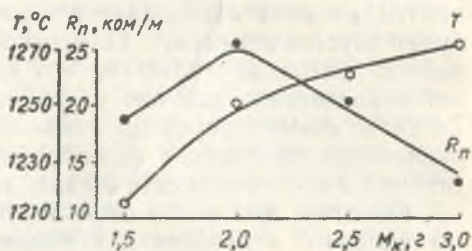


Рис. 25. Зависимость погонного сопротивления микропровода и температуры капли от ее массы

этом точка, в которой достигается максимум погонного сопротивления, соответствует величине критической массы. Приведенной зависимости может быть дано следующее количественное объяснение. При массах, меньших критической, вес капли полностью уравновешивается электромагнитными силами. Поэтому литье микропровода для различных масс заплавленного металла или сплава протекает, по существу, в одинаковых гидродинамических условиях. В этом случае погонное сопротивление микропровода определяется только температурой расплава. Этот режим литья, который можно назвать докритическим, отличается тем, что в нем решающую роль играет тепловая сторона процесса получения микропровода. После того как масса капли делается больше критической, часть ее веса останется некомпенсированной, вследствие чего избыток расплава будет стремиться самопроизвольно вытечь вниз. Поэтому в послекритическом режиме определяющую роль играют уже магнитогидродинамические явления. И так как в этом случае даже незначительные внешние усилия приводят в движение большие объемы расплава, то понятно, что погонное сопротивление падает с увеличением массы капли.

Экспериментальные данные по зависимости критической массы от частоты в [22] описаны уравнением

$$m_k = \frac{c_1}{\omega^{3/2}} + c_2,$$

где c_1 и c_2 — некоторые постоянные. Например, для индуктора с углом раствора 90° и высотой 13 мм при литье марганцевого микропровода с трубками из стекла «нонекс» диаметром $11 \pm 0,2$ мм и толщиной стенки $1,1 \pm 0,1$ мм $c_1 = 9,1 \cdot 10^3$, а $c_2 = 1,5$; при этом m_k измеряется в г, а ω — в кГц.

§ 4. О форме капли в условиях литья

Геометрическая конфигурация луковицеобразной капли в условиях литья микропровода определяется самыми разнообразными причинами и чрезвычайно чувствительна к любым внешним воздействиям. На рис. 26 (вкл. 2) приведены (последовательно) кадры киносъемки капли в «рабочем» состоянии. Наблюдения показывают, что внутри капли происходят исключительно сложные хаотические перемещения одних слоев относительно других, капля как бы «дышит» и каждая точка поверхности передвигается по своей траектории, на первый взгляд, не имеющей ничего общего с траекториями соседних точек. В связи с этим экспериментальное исследование формы капли без ясного теоретического ориентира вряд ли возможно и имеющиеся сведения [15, 23] о форме капли ограничиваются несколькими общими замечаниями описательного характера.

В эксперименте условно разделяют луковицеобразную поверхность капли на несколько зон (рис. 27). Так называемый первичный конус

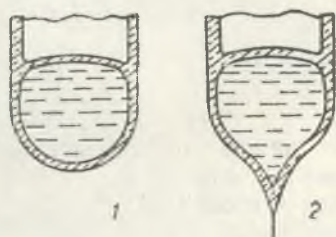


Рис. 27. Экспериментальная форма тигля при литье микропровода в нерабочем (1) и рабочем (2) состояниях

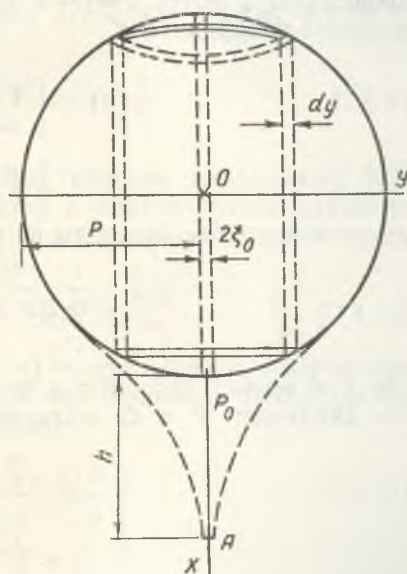


Рис. 28. Исходная форма сферической недеформированной капли

растягивания начинается от нижнего основания сферической поверхности капли и оканчивается в точке, принадлежащей образующей вторичного конуса. Такое разделение «зон растягивания» связано с достаточно быстрым изменением радиуса кривизны при переходе от одной точки к другой вдоль луковицы, при этом имеется некоторая область, где скорость изменения радиуса кривизны резко возрастает и которая служит условной границей двух конусов. Так, по данным

В. А. Шпирнова [15], радиус кривизны первичного конуса в среднем равен 3—5 мм, в то время как радиус кривизны вторичного конуса превышает 100 мм. Естественно, что рассмотренное деление зоны растягивания на две является весьма условным, как и граница между ними.

Теоретическое исследование формы капли проведено Ю. В. Чугаевским [24, 25], рассмотревшим деформацию первоначально сферической капли (рис. 28) радиуса ρ , находящейся под действием внешних сил типа

$$F = \begin{cases} F_0 & \text{при } r < \xi_0, \\ 0 & \text{при } r > \xi_0, \end{cases} \quad (2.4.1)$$

где $\xi < \rho$ и F_0 записано в цилиндрической системе координат. За длину зоны растягивания примем расстояние от нижнего основания недеформированной капли до фронта кристаллизации. Поместив начало координат в центр сферической капли, получим, что кристаллизация происходит в точке $x = \rho + l$. Предположим, что вязкость η есть такая функция координаты x

$$\eta(x) = \begin{cases} \eta_0 = \text{const} & \text{при } x < \rho + l, \\ \infty & \text{при } x > \rho + l. \end{cases} \quad (2.4.2)$$

Для разрешения вопроса деформации такой капли предварительно рассматривается задача о стационарном движении жидкости в цилиндрической трубке. Исходим из уравнения Навье—Стокса [26]:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \nabla \vec{v} = -\frac{1}{\delta} \nabla p + \frac{\eta}{\delta} \Delta \vec{v} + \vec{F}, \quad (2.4.3)$$

где \vec{v} — вектор скорости в некоторой точке; δ — плотность жидкости; p — давление; ∇ и Δ обычные операторы Гамильтона и Лапласа:

$$\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z},$$

$$\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Предполагается, что вязкость не зависит от температуры, кроме того,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} &= 0, \\ \nabla P &= 0, \\ \vec{V} \nabla \vec{V} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.4.4)$$

откуда автоматически следует $\nabla \vec{v} = 0$. Уравнение (2.4.3) примет вид

$$\frac{\eta_0}{\delta} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv}{dr} \right) = -F(r). \quad (2.4.5)$$

Граничные условия выбираются обычными для течения жидкости в трубе, т. е. принимаются условия «прилипания» частиц жидкости к стенке и симметричность течения (отсутствие градиента на оси):

$$v(r)|_{r=\rho} = 0, \quad \frac{dv}{dr} \Big|_{r=0} = 0. \quad (2.4.6)$$

Кроме того, на границе $r = \xi_0$ должна сохраняться непрерывность скоростей и их радиальных градиентов

$$\begin{aligned} v_1(r)|_{r=\xi_0} &= v_2(r)|_{r=\xi_0}, \\ \frac{dv_1(r)}{dr} \Big|_{r=\xi_0} &= \frac{dv_2(r)}{dr} \Big|_{r=\xi_0}. \end{aligned} \quad (2.4.7)$$

Решение уравнения (2.4.5) при граничных условиях (2.4.6) — (2.4.7) имеет вид

$$v_1(r) = -\frac{\delta F_0}{4\eta_0} \left[(r^2 - \xi_0^2) - 2\xi_0^2 \ln \frac{\rho}{\xi_0} \right], \quad (2.4.8)$$

$$v_2(r) = -\frac{\delta F_0}{2\eta_0} \xi_0^2 \ln \frac{r}{\rho}. \quad (2.4.9)$$

В [24] предполагается, что форма продольного разреза искомой однородной луковицы определяется уравнением

$$\rho^2 = r^2 + [x - \Omega(r, \tau)]^2, \quad (2.4.10)$$

где r — цилиндрическая координата; $\Omega(r, \tau)$ — приращение, получаемое некоторой точкой сферы за время образования луковицы τ . Предполагая, что $\Omega(r, \tau) = v(r)\tau$, а $\tau = l/v_1(0)$, найдем

$$\rho^2 = r^2 + \left[x + \frac{2l}{1 + 2 \ln \frac{\rho}{\xi_0}} \ln \frac{r}{\rho} \right]^2. \quad (2.4.11)$$

На рис. 29 приведены теоретические кривые, построенные в плоскости (x, y) по уравнению (2.4.11) для трех случаев:

$$\rho:l:\xi_0 = 1:2:0,01,$$

$$\rho:l:\xi_0 = 1:1:0,01,$$

$$\rho:l:\xi_0 = 1:0,5:0,01.$$

При обобщении рассмотренной задачи на двуслойный случай (металлическая капля в стеклянной оболочке) в качестве недеформированной поверхности в [24, 25] выбрана двуслойная параболоидноцилиндрическая форма (рис. 30). Предполагается, что оба слоя различаются

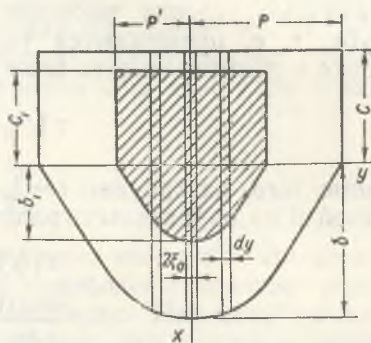
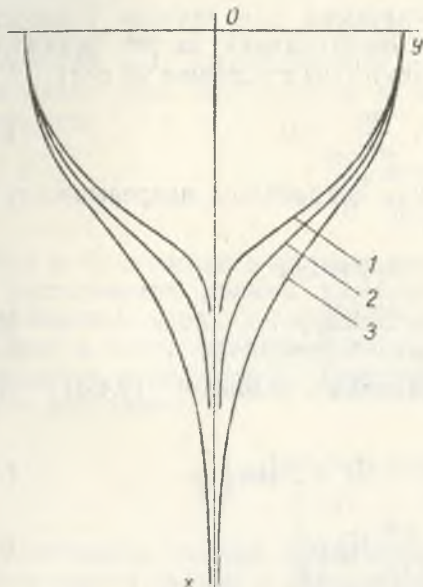


Рис. 29. Расчетные формы рабочей капли в плоскости (x, y)

Рис. 30. Параболоидно-цилиндрическая исходная форма капли

только вязкостью (η, η') и плотностью (δ, δ') . Уравнения параболоидов записываются так:

$$x = -\frac{b}{\rho^2} r^2 + b; \quad x = -\frac{b'}{\rho'^2} r^2 + b', \quad (2.4.12)$$

а уравнение Навье—Стокса в соответствии с [26] будет

$$\text{где} \quad (\psi r^2 + \varphi) \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv}{dr} \right) = \begin{cases} -(\psi' r^2 + \varphi') r F_0, \\ 0, \end{cases} \quad (2.4.13)$$

$$\psi = -\left\{ \frac{b'}{\rho'^2} (\eta' - \eta) + \eta \frac{b}{\rho^2} \right\}, \quad \varphi = (\eta' - \eta) (c' + b') + \eta (b + c), \quad (2.4.14)$$

$$\psi' = \psi \begin{pmatrix} \eta \rightarrow \delta \\ \eta' \rightarrow \delta' \end{pmatrix}, \quad \varphi' = \varphi \begin{pmatrix} \eta \rightarrow \delta \\ \eta' \rightarrow \delta' \end{pmatrix}.$$

Граничные условия остаются прежними, для поля скоростей находим

$$v_1 = \frac{F_0 \psi'}{4\psi} \left(\xi_0^2 - 2\xi_0^2 \ln \frac{\xi_0}{\rho} - r^2 \right) + \frac{F_0 (\varphi' \psi - \varphi)}{2\psi^2} \times \\ \times \left[\Phi(\xi_0) - \Phi(r) - \ln \frac{\xi_0}{\rho} \ln (\psi \xi_0^2 - \varphi) \right], \quad (2.4.15)$$

$$v_2 = \left[\frac{F_0 \psi'}{2\psi} \xi_0^2 + \frac{F_0 (\varphi' \psi - \varphi)}{2\psi^2} \ln (\psi \xi_0^2 - \varphi) \right] \ln \frac{\rho}{r}, \quad (2.4.16)$$

где Φ — не берущийся в элементарных функциях интеграл вида

$$\Phi(r) = \int \frac{\ln(\psi r^2 + \varphi)}{r} dr. \quad (2.4.17)$$

Геометрия луковцеобразной поверхности описывается теперь уравнением

$$x - \frac{h}{v_1(0)} v_2 = -\frac{b}{\rho^2} r^2 + b. \quad (2.4.18)$$

Другой подход к расчету формы поверхности капли в квазистационарном режиме был развит в работе [27], в которой рассматривалась форма жидкой капли при действии на нее гравитационных сил, поверхностного натяжения, электромагнитного давления и натяжения вязкой стеклянной оболочки. Задача решалась для проводящей жидкости в поле индуктора в виде бесконечной конической воронки при ярко выраженном поверхностном эффекте, при этом предполагается, что толщина стеклянной оболочки пренебрежимо мала по сравнению с ее внутренним радиусом. В этом случае градиент давления по высоте жидкости задается уравнением

$$\frac{dP}{dz} = \rho. \quad (2.4.19)$$

Давление в капле можно представить [27] в виде суммы трех составляющих: электромагнитного давления $\sigma_{эм}$, давления сил поверхностного натяжения $P_{п.н}$, давления P_c растянутой стеклянной оболочки на металлическое ядро. Кроме того, в динамическом режиме к основанию расплава прикладывается еще сила натяга F_n , связанная с литьем микропровода. В [27] указанные силы представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{эм} &= \frac{\mu_0 H^2}{2}, \\ P_{п.н} &= \sigma \left[\frac{1}{r(r^2+1)^{1/2}} - \frac{r''}{(r^2+1)^{3/2}} \right], \\ P_c &= -\sigma_3 \delta \frac{r''}{(r^2+1)^{3/2}}, \end{aligned} \quad (2.4.20)$$

$$F_n = 2\pi r (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \delta).$$

$$\text{Здесь } H = \frac{\Phi}{2\pi\mu_0 (r^2 + z^2) \left[\frac{z}{(r^2 + z^2)^{1/2}} - \cos \alpha_n \right]}, \quad (2.4.21)$$

$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$, α_n — угол конусности индуктора; r и z — текущие координаты точки поверхности капли, σ_3 — растягивающие напряжения в стекле, σ — толщина стеклянной оболочки.

Уравнение (2.4.19) рассматривается в двух областях. В первой существенны все перечисленные силы, вторая область отличается тем, что в ней $H \rightarrow 0$, $\sigma_3 = 0$; кроме того, здесь поверхностное натяжение σ^* будет не таким, как в нижней части капли, и появляется дополнительная разность давлений ΔP , связанная с разрежением в стеклянной трубке. После введения безразмерных координат

$$y = r \sqrt{\frac{\rho}{\sigma}}; \quad x = z \sqrt{\frac{\rho}{\sigma}} \quad (2.4.22)$$

и безразмерных критериев подобия

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \frac{2\pi\sigma}{F_n} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}, \\ q_2 &= \frac{\Phi^2}{4\pi^2\mu_0\sigma} \left(\frac{P}{\sigma}\right)^{3/2}, \\ q_3 &= \cos \alpha_n, \\ q_4 &= \frac{\sigma^*}{\sigma}, \\ q_5 &= \frac{\Delta P}{\sqrt{\sigma\rho}}, \end{aligned} \right\} \quad (2.4.23)$$

в работе [27] получена следующая система уравнений, связывающая координаты точек поверхности капли в первой области:

$$\left\{ \begin{aligned} y' &= u, \\ u' &= w, \\ w' &= \frac{uw}{y} + \frac{3uw^2}{u^2+1} + q_1 y (u^2+1)^{3/2} - \frac{q_1 u (u^2+1)}{y} - q_1 u w - \\ &- q_1 q_2 (u^2+1)^{3/2} y \frac{2x^2+y^2+xyu-2q_3(yu+x)\sqrt{x^2+y^2}}{(x^2+y^2)(x-q_3\sqrt{x^2+y^2})^3}. \end{aligned} \right.$$

Система уравнений для второй области отличается от (2.4.24) последним уравнением, которое теперь имеет вид

$$w' = \frac{3uw^2}{u^2+1} + q_4 (u^2+1)^{3/2} - \frac{u(u^2+1)}{y^2} - \frac{uw}{y}. \quad (2.4.25)$$

Граничные условия для приведенных систем уравнений имеют вид

$$\begin{aligned} y_1(x_2) &= y_2(x_2) = y_k, \\ u_1(x_2) &= u_2(x_2) = 0, \end{aligned}$$

$$\omega_1(x_2) = \omega_2(x_2) \frac{q_1 y_k}{q_4} + \frac{q_1 q_2 y_k}{2(y_k^2 + x_2^2) \left(x_2^2 - q_3 \sqrt{x_2^2 + y_k^2} \right)} + q_1 q_5 y_k - \frac{q_1(1 - q_4)}{q_4}, \quad (2.4.26)$$

$u_2(x_3) = -\infty$ и $y_2(x_3) = y_c$ — для капельного и непрерывного процессов соответственно. Здесь x_2 и y_k — безразмерные координаты точек поверхности капли на экваторе, т. е. когда функция $y(x)$ достигает максимума; y_c — радиус питающего стержня.

В [27] поставленная задача решалась на ЭВМ «Минск-22». На рис. 31 приведена (из этой работы) расчетная форма поверхности капли для $q_1 = 1$, $q_2 = 30$, $q_3 = 0,5$ и $q_5 = 0$.

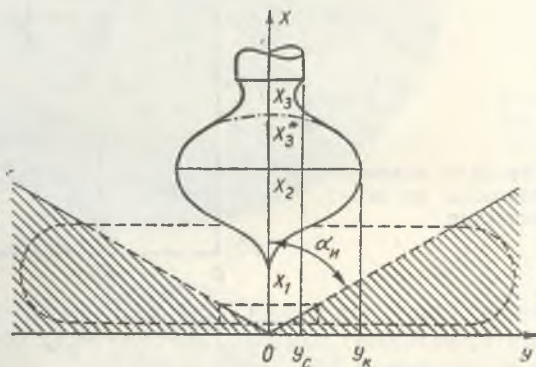


Рис. 31. Расчетная форма капли при литье микропровода согласно [27]

Отметим еще, что в [28] на базе многочисленных измерений на фотографиях капли в рабочем состоянии ее форма аппроксимируется гиперболическим тангенсом. Однако такую аппроксимацию следует считать менее удовлетворительной, нежели рассмотренную, ибо она даже не претендует на какое-либо выявление физики микролития в капилляр, а потому ее эвристическое значение ограничено.

§ 5. Механика формирования микропровода

При анализе условий формирования микропровода [29] силы, действующие на процесс, разделены на квазистатические и динамические. К первым отнесены сила тяжести металла и стекла, капиллярного давления, электромагнитного давления, силы, связанные с разностью между внешним давлением и давлением в стеклянной трубке. Динамичес-

кие силы представлены силами натяжения микропровода при его намотке на бобину, силами инерции, возникающими при ускорении движущихся слоев металла и стекла, силами вязкого сопротивления растяжению стекла и, наконец, силами, связанными с образованием новых поверхностей стекла и металла при формировании микропровода. Как показывает предыдущий анализ, такое разделение является чрезвычайно условным и идеализированным. Оно не охватывает целого комплекса явлений, таких, как, например, образование шейки или смачиваемость на границе металл—стекло. Однако даже простой перечень приведенных сил может вначале послужить отправной точкой для более детального исследования.

Некоторые из указанных сил легко доступны непосредственному измерению. Так, в [29] изучена зависимость силы натяжения медного микропровода от скорости вытягивания (рис. 32). Очевидно, возраста-

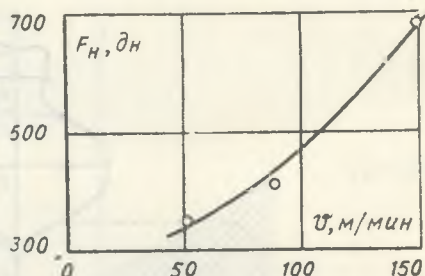


Рис. 32. Зависимость силы натяжения медного микропровода от скорости вытягивания

ние силы натяжения при увеличении скорости вытягивания связано с двумя основными причинами: изменением величины ускоряемой массы и увеличением ее ускорения.

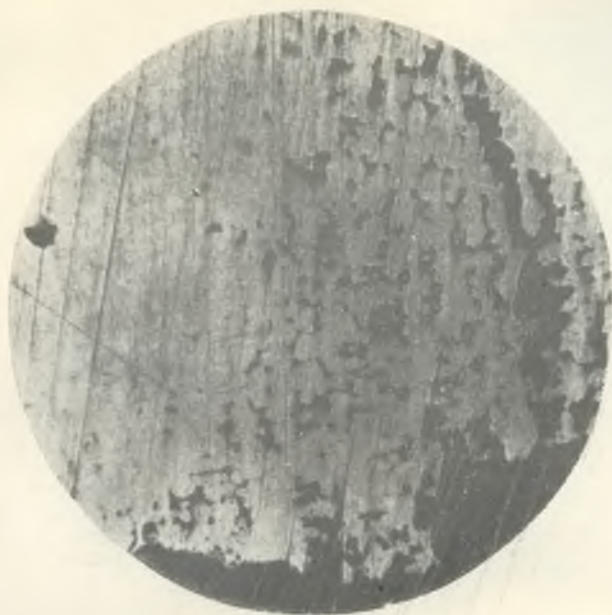
Основные уравнения теории поверхностных явлений позволяют сформулировать условия, обеспечивающие заполнение металлом капилляра, образующегося в процессе микролитья, и вывести формулу для минимального радиуса микропровода, который может быть получен вытягиванием из металлической капли в стеклянной оболочке в условиях отсутствия смачивания между стеклом и металлом. Ниже приводится вывод такой формулы [30].

Уравнение Лапласа [26], задающее перепад капиллярного давления на границе двух сред, имеет вид

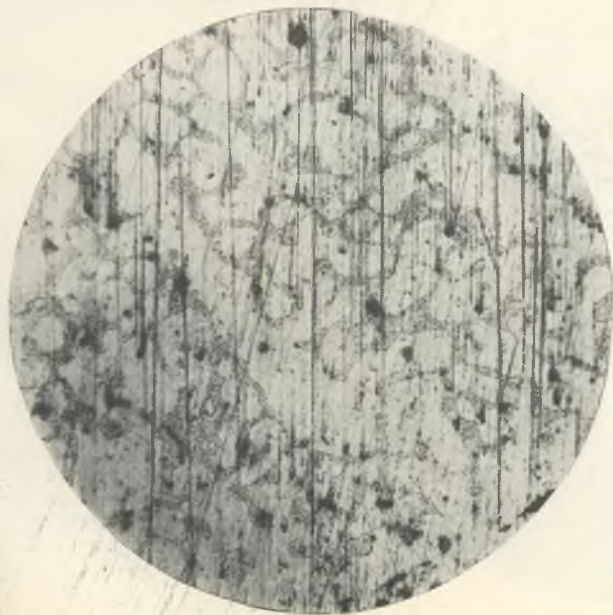
$$P - P_0 = \sigma_{01} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2.5.1)$$

где σ_{01} — коэффициент поверхностного натяжения на границе сред (0,1); R_1, R_2 — главные радиусы кривизны в рассматриваемой точке. Обобщение этого уравнения на случай шарообразной многослойной модели дает

$$\Delta_{0m} = P_m - P_0 = 2 \sum_{n=0}^{m-1} \sigma_{n,n+1} \frac{1}{R_{n+1}}, \quad (2.5.2)$$



Р и с. 5. Микрошлиф медной микрованны с включениями стекла ($\times 150$)



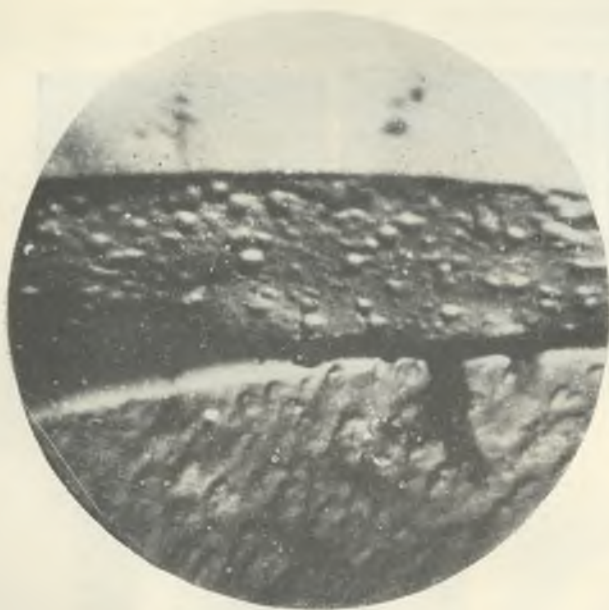
Р и с. 6. Микрошлиф медной микрованны (травленый). Темные разводы представляют собой закись меди, равномерно распределенную по всему объему, отдельные черные включения — силикаты ($\times 150$).



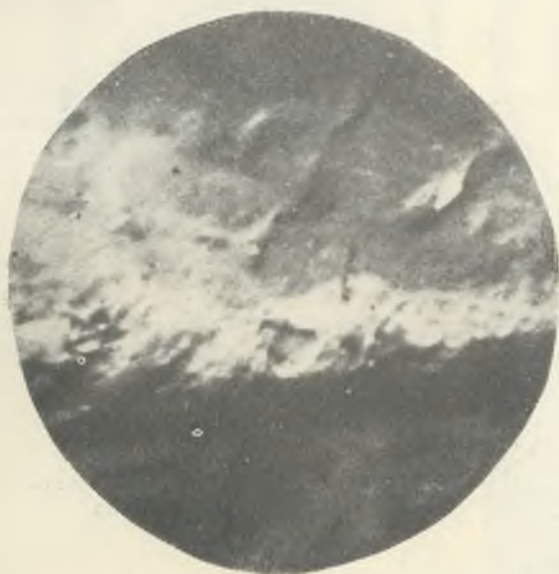
Рис. 7. Микрошлиф микро-
ванны на 15-й минуте (не трав-
ленный). Темные включения ти-
па дендритов — силикаты, от-
дельные крупные включения—
силикаты, всплывшие в верх-
нюю часть микрованны ($\times 150$)



Рис. 8. Микрошлиф медной
микрованны на 30-й минуте (не
травленный). Распределение си-
ликатов по всему объему мик-
рованны неравномерно ($\times 150$)



Р и с. 11. Микрофотография микропровода с медной жилой (поперечный срез). Светлое поле — стекло, темная полоса — переходной слой, следующее за этим — металл жилы (×8500)



Р и с. 12. Микрофотография микропровода с серебряной жилой (продольный срез). В средней части фотографии виден четко выраженный переходный слой между металлом жилы и стеклянной изоляцией (×8500)



Рис. 26. Последовательные кадры киносъемки капли в «рабочем состоянии»

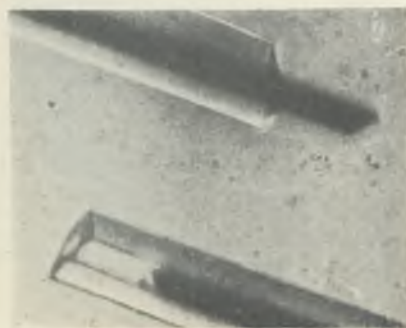
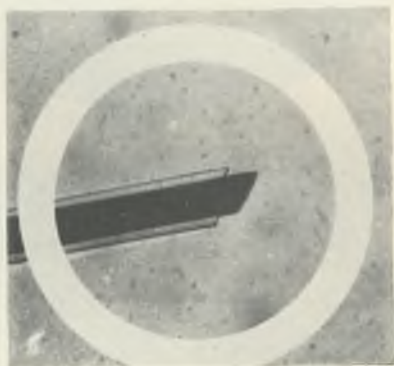
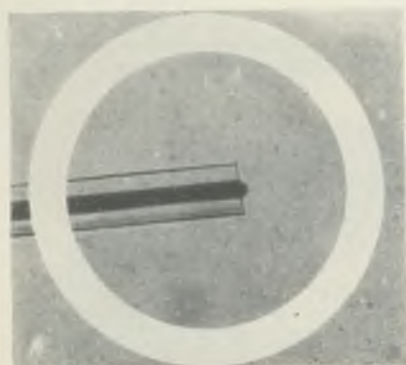


Рис. 83. Характерные виды разрушения микропровода

Здесь $\Delta \sigma_m$ — капиллярное давление внутри m -слоя; R_{n+1} — внешний радиус $n+1$ слоя, причем слои отсчитываются от внешней оболочки к центру. Если в капле имеются температурные градиенты, то σ является функцией R и капиллярное давление запишется в виде

$$P(R) - P_0 = \frac{2\sigma(R_1)}{R_1} - 2 \int_{R_2}^{R_1} \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \sigma(R)}{\partial R} dR. \quad (2.5.3)$$

В условиях процесса микролитья капля представляется в виде трехслойной модели — сферического металлического ядра, покрытого окисной пленкой и находящегося внутри стеклянной оболочки. Теперь условие вхождения металла в капилляр согласно [30] записывается так:

$$P_{(+)} + P_0 - P_{(-)} > 0, \quad (2.5.4)$$

где P_0 — внешнее давление, а $P_{(+)}$ и $P_{(-)}$ — давление, вталкивающее и выталкивающее металл в капилляр. Давления $P_{(+)}$ и $P_{(-)}$ представлены [25, 30] в следующем виде:

$$P_{(+)} = \frac{2[\sigma^{oc}(T_k) + \sigma^{mo}(T_k)]}{R} + \frac{2\sigma^{cb}(T_1)}{R_1} + \frac{2\sigma^{cb}(0)}{T_{кр}} \int_{R_2}^{R_1} \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial T}{\partial R} dR, \quad (2.5.5)$$

$$P_{(-)} = 2[\sigma^{oc}(T_{пл}) - \sigma^{cb}(T_{пл})] \left[\frac{1}{\rho + \Delta} + \frac{\sigma^{om}(T_{пл})}{\rho \sigma^{ob}(T_{пл})} \right]. \quad (2.5.6)$$

Здесь $\sigma^{oc}(T_k)$, $\sigma^{cm}(T_k)$ — коэффициенты поверхностного натяжения на границах окись—стекло, металл—окись при температуре капли T_k ; $\sigma^{cb}(T_1)$ — коэффициент поверхностного натяжения на границе стекло—воздух при температуре поверхности стеклянной оболочки; $\sigma^{oc}(T_{пл})$, $\sigma^{cb}(T_{пл})$, $\sigma^{om}(T_{пл})$, $\sigma^{vo}(T_{пл})$ — коэффициенты поверхностного натяжения на границах стекло—окисел, стекло—вакуум, окисел—металл, вакуум—окисел при температуре кристаллизации металла $T_{пл}$, ρ и Δ — радиус жилы и толщина окисной пленки; $T_{кр}$ — критическая температура стекла R_1 и R_2 — радиусы металлического ядра и стеклянной оболочки. Из (2.5.4) и (2.5.6) находим

$$\begin{aligned} & \frac{2\sigma^{oc}(T_k) + \sigma^{mo}(T_k)}{R_2} + \frac{2\sigma^{cb}(T_1)}{R_1} + 2 \frac{\sigma^{cb}(0)}{T_{кр}} \int_{R_2}^{R_1} \frac{1}{R} \times \\ & \times \frac{\partial T}{\partial R} dR + P_0 - 2[\sigma^{oc}(T_{пл}) - \sigma^{cb}(T_{пл})] \left(\frac{1}{\rho + \Delta} + \right. \\ & \left. + \frac{\sigma^{om}(T_{пл})}{\rho \sigma^{ob}(T_{пл})} \right) > 0. \end{aligned} \quad (2.5.7)$$

Если $P_0 \sim 10^5$ дн/см², то

$$\frac{\sigma_{(0)}^{св}}{T_{кр}} \int_{R_2}^{R_1} \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial T(R)}{\partial R} dR < \frac{\sigma^{св}(T_1)}{R_1} \sim \frac{\sigma^{св}(T_k) + \sigma^{ом}(T_k)}{R_2} \sim 10^3 \frac{дн}{см^2}$$

и из (2.5.7) имеем

$$P_0 - 2[\sigma^{св}(T_{пл}) - \sigma^{св}(T_{пл})] \left[\frac{1}{\rho + \Delta} + \frac{\sigma^{ом}(T_{пл})}{\rho \sigma^{св}(T_{пл})} \right] > 0. \quad (2.5.8)$$

Это дает для минимального радиуса выражение

$$\rho_{\min} = \frac{1}{2} \lambda^{-1} (\sqrt{\xi^2 + \eta} - \xi), \quad (2.5.9)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \xi &= P_0 \Delta \sigma^{св}(T_{пл}) - 2[\sigma^{св}(T_{пл}) - \sigma^{св}(T_{пл})] \times \\ &\quad \times [\sigma^{св}(T_{пл}) + \sigma^{ом}(T_{пл})], \\ \eta &= 4P_0 \Delta \sigma^{св}(T_{пл}) \sigma^{ом}(T_{пл}), \\ \lambda &= P_0 \sigma^{св}(T_{пл}). \end{aligned} \right\} \quad (2.5.10)$$

Если толщиной окисной пленки можно пренебречь, то получим

$$\rho_{\min} = \frac{2[\sigma^{св}(T_{пл}) - \sigma^{св}(T_{пл})]}{P_0 \sigma^{ом}(T_{пл})} [\sigma^{св}(T_{пл}) + \sigma^{ом}(T_{пл})]. \quad (2.5.11)$$

Приведенные уравнения относятся к случаю несмачивающейся бифазы, и из них следует возможность микролитрия в этих условиях. Наличие смачивания улучшает условия формирования микропровода, однако, как показывают исследования, смачивание в процессе литья часто нарушается, вследствие чего спай стекла с металлом носит прерывистый характер.

§ 6. Колебания капли в процессе литья

Колебания капли в процессе литья рассмотрены в [31, 32]. Как и раньше, капля металла в стеклянной трубке рассматривается в качестве столба ньютоновской жидкости. Это позволяет изучить колебания капли с учетом ряда гидродинамических эффектов.

1. Осесимметричное течение вязкой несжимаемой жидкости по трубке в некотором массовом поле \vec{F} ($F_\varphi=0$, $F_r=0$, $F_z=\gamma(r, t)$) при отсутствии градиентов давления ($\nabla P=0$) описывается линеаризованными (для любых Re [33]) уравнениями Навье—Стокса, имеющими в цилиндрической системе координат (r, φ, z) вид [26]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_z(r, t)}{\partial t} &= \frac{\eta}{\delta} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_z(r, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z(r, t)}{\partial r^2} + \gamma(r, t) \right), \\ v_\varphi &= v_r = 0. \end{aligned} \quad (2.6.1)$$

Здесь η и δ — вязкость и плотность жидкости соответственно; z — ось трубы.

Введем смещение $u(r, t)$:

$$v_z(r, t) = \frac{\partial u(r, t)}{\partial t}. \quad (2.6.2)$$

Используя (2.6.1), колебания жидкости в трубке можно описать уравнением

$$\delta \frac{\partial^2 u(r, t)}{\partial t^2} - \eta \frac{\partial^2}{\partial r^2} \left(\frac{\partial u(r, t)}{\partial t} \right) - \frac{\eta}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u(r, t)}{\partial t} \right) + \beta \frac{\partial u(r, t)}{\partial t} + \frac{k}{l} u(r, t) = \delta \gamma(r, t). \quad (2.6.3)$$

Пятый член уравнения представляет собой при достаточно малых $u(r, t)$ упругую реакцию мембраны (k — упругий коэффициент, l — длина трубки). Член $\beta \frac{\partial u}{\partial t}$ введен для общности и обуславливает дополнительное затухание, имеющее место, например, если трубку погрузить в вязкую среду ($\beta = \text{const}$). Граничные и начальные условия естественно выбрать в виде

$$\left. \frac{\partial u(r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad u(r, t)|_{r=\rho} = 0, \quad (2.6.4)$$

$$u(r, t)|_{t=0} = f(r); \quad \left. \frac{\partial u(r, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0, \quad (2.6.5)$$

где ρ — радиус трубки. Заметим, что первое граничное условие (2.6.4) накладывает на $f(r)$ требование иметь в точке $r=0$ экстремум, что практически чаще всего и случается. Вообще же это ограничение с $f(r)$ можно снять, если условие $\left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$ заменить требованием конечности $f(r)$ в области ($0 \leq r$). При выводе (2.6.3) было предположено, разумеется, что движение жидкости в трубке мало отличается от ее течения внутри бесконечно длинного цилиндра ($l \gg \rho$).

Рассмотрим свободные колебания ($\gamma(r, t) = 0$):

$$\delta \frac{\partial^2 u(r, t)}{\partial t^2} - \eta \frac{\partial^2}{\partial r^2} \left(\frac{\partial u(r, t)}{\partial t} \right) - \frac{\eta}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u(r, t)}{\partial t} \right) + \beta \frac{\partial u(r, t)}{\partial t} + \xi u(r, t) = 0, \quad (2.6.6)$$

где $\xi = \frac{k}{l}$.

Положим

$$u(r, t) = R(r) T(t) \quad (2.6.7)$$

и разделим переменные, тогда

$$\begin{aligned} & \left[\delta \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} + \beta \frac{\partial T(t)}{\partial t} + \xi T(t) \right] \left(\frac{\partial T(t)}{\partial t} \right)^{-1} = \\ & = \left[\gamma_1 \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{\eta}{r} \cdot \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right] R^{-1}(r) = -a \end{aligned} \quad (2.6.8)$$

или

$$\gamma \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{\eta}{r} \cdot \frac{\partial R(r)}{\partial r} + aR(r) = 0, \quad (2.6.9)$$

$$\delta \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} + (\beta + a) \frac{\partial T(t)}{\partial t} + \xi T(t) = 0. \quad (2.6.10)$$

Решение уравнения (2.6.9) представляет собой суперпозицию функций Бесселя первого и второго рода [4]:

$$R(r) = C_1 I_0 \left(\sqrt{\frac{a}{\gamma}} r \right) + C_2 Y_0 \left(\sqrt{\frac{a}{\gamma}} r \right). \quad (2.6.11)$$

Требование конечности $R(r)$ в точке $r=0$ или первое условие (2.6.4) дает $C_2=0$. Второе условие (2.6.4) задает уравнение собственных значений a :

$$I_0 \left(\sqrt{\frac{a}{\gamma}} \rho \right) = 0. \quad (2.6.12)$$

Если λ_n — один из корней функции $I_0(x)$, то соответствующее собственное значение равно

$$a_n = \frac{\lambda_n^2}{\rho^2} \gamma. \quad (2.6.13)$$

Вид решения уравнения (2.6.10) [34] определяется свойствами корней его характеристического уравнения. Именно при разных вещественных корнях решение описывает аperiодическое движение жидкости вида

$$\begin{aligned} T_n(t) = & A_n \exp \left[\left\{ -\frac{(\beta + a_n)}{2\delta} + \frac{1}{2\delta} \sqrt{(\beta + a_n)^2 - 4\xi\delta} \right\} t \right] + \\ & + B_n \exp \left[\left\{ -\frac{(\beta + a_n)}{2\delta} - \frac{1}{2\delta} \sqrt{(\beta + a_n)^2 - 4\xi\delta} \right\} t \right], \end{aligned} \quad (2.6.14)$$

$$(\beta + a_n)^2 - 4\xi\delta > 0. \quad (2.6.15)$$

Комплексно сопряженные корни задают затухающие колебания:

$$T_n(t) = \exp \left[-\frac{(\beta + a_n)}{2\delta} t \right] [A_n \cos \alpha_n t + B_n \sin \alpha_n t], \quad (2.6.16)$$

$$\alpha_n = \frac{1}{2\delta} \sqrt{4\xi\delta - (\beta + a_n)^2}, \quad (2.6.17)$$

$$(\beta + a_n)^2 - 4\xi\delta < 0. \quad (2.6.18)$$

Наконец, кратные действительные корни дадут решение

$$T_n(t) = (A_n + B_n t) \exp\left[-\frac{(\beta + a_n)}{2\delta} t\right], \quad (2.6.19)$$

$$(\beta + a_n)^2 - 4\xi\delta = 0, \quad (2.6.20)$$

как и (2.6.14), описывающее аperiодическое движение жидкости в трубке. В случае (2.6.15) полное решение уравнения (2.6.6), следовательно, запишется в виде ряда

$$U(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) \left\{ A_n \exp\left[\left(-\frac{(\beta + a_n)}{2\delta} + \frac{1}{2\delta} \sqrt{(\beta + a_n)^2 - 4\xi\delta}\right)t\right] + B_n \exp\left[\left(-\frac{(\beta + a_n)}{2\delta} - \frac{1}{2\delta} \sqrt{(\beta + a_n)^2 - 4\xi\delta}\right)t\right] \right\}. \quad (2.6.21)$$

Вспользуемся первым начальным условием (2.6.5)

$$U(r, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) (A_n + B_n) = f(r). \quad (2.6.22)$$

Рассматривая (2.6.22) как ряд Фурье-Бесселя для $f(r)$ [35], найдем коэффициенты этого разложения по Ломмелю:

$$P_n = A_n + B_n = \frac{2}{\rho^2 I_1^2(\lambda_n)} \int_0^{\rho} t f(t) I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} t\right) dt. \quad (2.6.23)$$

Используя далее второе начальное условие (2.6.5), найдем

$$A_n \left[-\frac{(\beta + a_n)}{2\delta} + \frac{1}{2\delta} \sqrt{(\beta + a_n)^2 - 4\xi\delta} \right] + B_n \left[-\frac{(\beta + a_n)}{2\delta} - \frac{1}{2\delta} \sqrt{(\beta + a_n)^2 - 4\xi\delta} \right] = 0, \quad (2.6.24)$$

что определяет A_n и B_n в виде:

$$A_n = \frac{(\beta + a_n) + \sqrt{(\beta + a_n)^2 - 4\xi\delta}}{2\sqrt{(\beta + a_n)^2 - 4\xi\delta}} P_n, \\ B_n = \frac{-(\beta + a_n) + \sqrt{(\beta + a_n)^2 - 4\xi\delta}}{2\sqrt{(\beta + a_n)^2 - 4\xi\delta}} P_n. \quad (2.6.25)$$

В случае (2.6.16) точное решение исходного уравнения запишется:

$$U(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) \exp\left[-\frac{(\beta + a_n)}{2\delta} t\right] \times \\ \times [A_n \cos \alpha_n t + B_n \sin \alpha_n t], \quad (2.6.26)$$

где, как легко видеть, для выполнения (2.6.5), следует положить

$$A_n = P_n, \quad B_n = \frac{(\beta + a_n)}{2\delta \alpha_n} \cdot P_n. \quad (2.6.27)$$

Аналогично в последнем варианте (2.6.19) найдем

$$U(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) (A_n + B_n t) \exp\left[-\frac{(\beta + a_n)}{2\delta} t\right], \quad (2.6.28)$$

где

$$A_n = P_n, \quad B_n = \frac{\beta + a_n}{2\delta} P_n. \quad (2.6.29)$$

Приведем еще выражения коэффициентов P_n для одного практически интересного случая. Положим

$$f(r) = \sigma(\rho^2 - r^2), \quad \sigma = \text{const}. \quad (2.6.30)$$

Такая функция соответствует параболоидальной геометрии мембран и может быть получена в результате движения вязкой жидкости в трубе под действием массового поля вида $F(F_\varphi=0, F_r=0, F_z=\gamma_0=\text{const})$, например, поля тяжести. Причем предполагается, что поле действует в течение времени $\tau \geq \tau^* \sim \frac{\rho}{c}$ (τ^* — время релаксации, c — скорость звука), но малого настолько, что упругой реакцией мембраны можно пренебречь. В момент $t=\tau$ поле отключается и жидкость начинает свободно колебаться в трубе под действием реакции мембран.

Итак,

$$P_n = \frac{2\sigma}{\rho^2 I_1^2(\lambda_n)} \int_0^\rho t(\rho^2 - t^2) I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} t\right) dt. \quad (2.6.31)$$

Полагая $I = \frac{\lambda_n}{\rho} t$ и трижды интегрируя по частям, найдем

$$P_n = 8 \sigma \rho^2 \lambda_n^{-3} I_1^{-1}(\lambda_n). \quad (2.6.32)$$

Корни характеристического уравнения для $T(t)$ ввиду положительности коэффициентов не могут быть положительными. При $t=0$ ряды сходятся, ибо они представляют начальное значение $u(\tau, t)$ в интервале $(0, \rho)$. При $t>0$ у членов ряда имеются множители вида $e^{\epsilon t}$, где $\epsilon < 0$

для вещественного ϵ и $\epsilon = Re\epsilon + Im\epsilon Re\epsilon < 0$ для комплексных ϵ . Последнее обстоятельство только улучшает сходимость рядов.

Перейдем теперь к вынужденным колебаниям. Решение уравнения (2.6.3) будем искать в виде ряда по собственным функциям задачи

$$u(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right). \quad (2.6.33)$$

Подставляя (2.6.33) в (2.6.3), найдем для $T_n(t)$:

$$T_n''(t) + \left[\nu \left(\frac{\lambda_n}{\rho}\right)^2 + \frac{\beta}{\delta} \right] T_n'(t) + \frac{k}{\delta L} T_n(t) = \alpha_n(t), \quad (2.6.34)$$

где $\nu = \frac{\eta}{\delta}$ — кинематическая вязкость; $\alpha_n(t)$ — коэффициенты Ломмеля [35] в разложении функции $\gamma(t)$ в ряд по собственным функциям ($\gamma(r, t)$ — массовое поле):

$$\gamma(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n(t) I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right), \quad (2.6.35)$$

то есть

$$\alpha_n(t) = \frac{2}{\rho^2 I_1^2(\lambda_n)} \int_0^{\rho} r \gamma(r, t) I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) dr. \quad (2.6.36)$$

Первое начальное условие (2.6.5) дает

$$u(r, 0) = f(r) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(0) I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) \quad (2.6.37)$$

или

$$T_n(0) = \frac{2}{\rho^2 I_1^2(\lambda_n)} \int_0^{\rho} r f(r) I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) dr. \quad (2.6.38)$$

Из второго начального условия (2.6.5) следует

$$\sum_{n=1}^{\infty} T_n'(0) I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) = 0, \quad (2.6.39)$$

что дает

$$T_n'(0) = 0. \quad (2.6.40)$$

Уравнение (2.6.34) и начальные условия (2.6.38) и (2.6.40) полностью определяют $T_n(t)$, а следовательно, и $u(r, t)$. Выберем $f(r)$ в виде

$$f(r) = \sigma(\rho^2 - r^2), \quad \sigma = \text{const.} \quad (2.6.41)$$

Параболоидальная геометрия мембран может быть получена в результате движения вязкой жидкости в трубе под действием массового поля \vec{F} вида

$$F_\varphi = F_r = 0, \quad F_z = \gamma_0 = \text{const}, \quad (2.6.42)$$

например, поля тяжести. Время действия поля τ при этом мало настолько, что упругой реакцией мембран можно пренебречь, но намного больше времени релаксации $\tau' \sim \frac{\rho}{c}$ (c — скорость звука) $\tau \gg \tau'$.

Пусть далее

$$\gamma = \gamma(t) = H_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2.6.43)$$

В таком случае согласно (2.6.36) и (2.6.38) для $\alpha_n(t)$ и $T_n(0)$ найдем

$$\alpha_n(t) = \frac{2H_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)}{\lambda_n I_1(\lambda_n)}, \quad (2.6.44)$$

$$T_n(0) = \frac{8\sigma\rho^2}{\lambda_n^3 I_1(\lambda_n)}. \quad (2.6.45)$$

Для $T_n(t)$ получено, таким образом, стандартное уравнение вынужденных колебаний с синусоидальной правой частью. Согласно, например [36], частное решение этого уравнения может быть найдено в формуле

$$\tilde{T}_n(t) = N_n \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \delta_n). \quad (2.6.46)$$

В нашем случае это означает

$$N_n = \frac{2H_0}{\lambda_n I_1(\lambda_n) \left[\sqrt{\left(\frac{k}{\delta l} - \omega_0^2\right)^2 + 4h_n^2 \omega_0^2} \right]}, \quad (2.6.47)$$

$$\text{tg } \delta_n = \frac{-l\omega_0 \left[\eta \left(\frac{\lambda_n}{\rho}\right)^2 - \beta \right]}{k - \delta\omega_0^2 l}, \quad (2.6.48)$$

$$h_n = \frac{1}{2} \left[\nu \left(\frac{\lambda_n}{\rho}\right)^2 - \frac{\beta}{\delta} \right]. \quad (2.6.49)$$

Удовлетворяя начальным условиям (2.6.40) и (2.6.45) в случае комплексных корней характеристического уравнения, найдем для $u(r, t)$:

$$u'(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) e^{-h_n t} \cdot \left[\left\{ \frac{8\sigma\rho^2}{\lambda_n^3 I_1(\lambda_n)} \frac{h_n}{P_n} - \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{h_n}{P_n} N_n \sin(\varphi_0 + \delta_n) - \frac{\omega_0}{P_n} N_n \cos(\varphi_0 + \delta_n) \Big\} \sin P_n t + \\
& + \left\{ \frac{8 \sigma \rho^2}{\lambda_n^3 I_1(\lambda_n)} - N_n \sin(\varphi_0 + \delta_n) \right\} \cos P_n t \Big] + \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} I_0 \left(\frac{\lambda_n}{\rho} r \right) N_n \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \delta_n), \tag{2.6.50}
\end{aligned}$$

где частота n -й гармоники собственных колебаний системы P_n равна

$$P_n = \sqrt{\frac{k}{\delta l} - \frac{1}{4} \left[v \left(\frac{\lambda_n}{\rho} \right)^2 - \frac{\beta}{\delta} \right]^2}. \tag{2.6.51}$$

Случай корней разных и действительных дает аperiodическое движение вида

$$\begin{aligned}
u''(r, t) = & \sum_{n=1}^{\infty} I_0 \left(\frac{\lambda_n}{\rho} r \right) \left\{ \frac{8 \sigma \rho^2}{\lambda_n^3 I_1(\lambda_n)} - \right. \\
& - \frac{\sqrt{\delta h_n^2 - \frac{k}{l} - h_n \sqrt{\delta}}}{2 \sqrt{\delta h_n^2 - \frac{k}{l}}} \left[\frac{8 \sigma \rho^2}{\lambda_n^3 I_1(\lambda_n)} - N_n \sin(\varphi_0 + \delta_n) \right] - \\
& \left. - N_n \frac{\omega_0 \sqrt{\delta}}{2 \sqrt{\delta h_n^2 - \frac{k}{l}}} \cos(\varphi_0 + \delta_n) - N \sin(\varphi_0 + \delta_n) \right\} \times \\
& \times \exp \left[\left(\sqrt{h_n^2 - \frac{k}{l}} - h_n \right) t \right] + \sum_{n=1}^{\infty} I_0 \left(\frac{\lambda_n}{\rho} r \right) \times \\
& \times \left\{ \frac{\sqrt{h_n^2 \delta - \frac{k}{l} - h_n \sqrt{\delta}}}{2 \sqrt{\delta h_n^2 - \frac{k}{l}}} \left[\frac{8 \delta \rho^2}{\lambda_n^3 I_1(\lambda_n)} - N_n \sin(\varphi_0 + \delta_n) \right] - \right. \\
& \left. - N_n \frac{\omega_0 \sqrt{\delta}}{\sqrt{h_n^2 \delta - \frac{k}{l}}} \cos(\varphi_0 + \delta_n) \right\} \cdot \exp \left[- \sqrt{h_n^2 - \frac{k}{\delta l}} + h_n \right] t \Big] + \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} I_0 \left(\frac{\lambda_n}{\rho} r \right) N_n \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \delta_n). \tag{2.6.52}
\end{aligned}$$

Специальный случай аperiodического движения соответствует случаю кратных действительных корней и имеет форму

$$u'''(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) e^{-h_n t} \left\{ \frac{8 \sigma \rho^2}{\lambda_n^3 I_1(\lambda_n)} - N_n \sin(\varphi_0 + \delta_n) + \left[\frac{8 \sigma \rho^2 h_n}{I_1(\lambda_n) \lambda_n^3} - N_n h_n \sin(\varphi_0 + \delta_n) - N_n \omega_0 \cos(\varphi_0 + \delta_n) \right] t \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) N_n \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \delta_n). \quad (2.6.53)$$

Ввиду наличия множителя вида e^{-ht} «собственное движение» системы во всех трех случаях быстро затухает с ростом t , так что асимптотическое выражение $u(r, t)$ можно записать как

$$u(r, t)|_{t \rightarrow \infty} \sim u'(r, t)|_{t \rightarrow \infty} \sim u''(r, t)|_{t \rightarrow \infty} \sim u'''(r, t)|_{t \rightarrow \infty} \sim \sum_{n=1}^{\infty} I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) N_n \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \delta_n). \quad (2.6.54)$$

Максимум N_n , как функции ω_0 , согласно (2.6.47) достигается при минимуме выражения

$$\Theta = (\bar{\omega}_0^2 - \omega_0^2)^2 + 4h_n^2 \omega_0^2 = \bar{\omega}_0^4 \left[\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\bar{\omega}_0^2}\right)^2 + 4 \frac{h_n^2}{\bar{\omega}_0^2} \frac{\omega_0^2}{\bar{\omega}_0^2} \right], \quad (2.6.55)$$

где принято $\bar{\omega}_0^2 = \frac{k}{\sigma t}$. Положим

$$q = \frac{\omega_0}{\bar{\omega}_0}, \quad m_n = \frac{2h_n}{\bar{\omega}_0^2}. \quad (2.6.56)$$

Тогда минимум функции $\Theta(q) = \bar{\omega}_0^4 [1 - q^2]^2 + m_n^2 q^2$ имеет место при

$$q = \sqrt{1 - \frac{m_n^2}{2}}. \quad (2.6.57)$$

Таким образом, рассматриваемая система способна резонировать в целом спектре частот ω_{on} , заданном условием (2.6.57)

$$\omega_{on} = \bar{\omega}_0 \sqrt{1 - \frac{2h_n^2}{\bar{\omega}_0^2}}. \quad (2.6.58)$$

II. Обратимся теперь к случаю, когда колебания жидкости в трубке возбуждаются не массовым полем ($\gamma(r, t) = 0$), а колебаниями

самой трубки, т.е. рассмотрим уравнение (2.6.31) с нулевой правой частью и неоднородными граничными условиями вида:

$$\begin{aligned} u(r, t)|_{r=\rho} &= u_0 \sin \omega_1 t, \\ u|_{r=0} &\neq \infty \end{aligned} \quad (2.6.59)$$

и при прежних начальных условиях (2.6.33). Сделаем замену $u(r, t)$ на $v(r, t)$ согласно

$$v(r, t) = u(r, t) - \frac{r^2}{\rho^2} u_0 \sin \omega_1 t. \quad (2.6.60)$$

Тогда уравнение (2.6.1) без правой части дает для $v(r, t)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 v(r, t)}{\partial t^2} - \eta \frac{\partial^3 v(r, t)}{\partial r^2 \partial t} - \frac{\eta}{r} \cdot \frac{\partial^2 v(r, t)}{\partial r \partial t} + \frac{\beta}{\sigma} \cdot \frac{\partial v(r, t)}{\partial t} + \\ + \frac{k}{\sigma l} v(r, t) = \frac{u_0 r^2}{\rho^2} \left(\omega_1^2 - \frac{k}{\sigma l} \right) \sin \omega_1 t + \\ + u_0 \omega_1 \left(\frac{4\nu}{\rho^2} - \frac{\beta r^2}{\sigma \rho^2} \right) \cos \omega_1 t = g(r, t) \end{aligned} \quad (2.6.61)$$

при граничных и начальных условиях

$$v(r, t)|_{r=\rho} = 0, \quad v(r, t) \text{ ограничено при } r \rightarrow 0, \quad (2.6.62)$$

$$v(r, t)|_{t=0} = f(r), \quad \left. \frac{\partial v(r, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = -u_0 \omega_1 \frac{r^2}{\rho^2}. \quad (2.6.63)$$

Будем, как и выше, искать решение $v(r, t)$ в виде ряда

$$v(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) I_0 \left(\frac{\lambda_n}{\rho} r \right).$$

Тогда для $T_n(t)$ снова получим уравнение вида (2.6.34), где $\alpha_n(t)$ определится как

$$\alpha_n(t) = \frac{2}{\rho^2 I_1^2(\lambda_n)} \int_0^{\rho} r \gamma(r, t) I_0 \left(\frac{\lambda_n}{\rho} r \right) dr = a_n \sin(\omega_1 t + \xi_n), \quad (2.6.64)$$

$$a_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}, \quad \operatorname{tg} \xi_n = \frac{B_n}{A_n}, \quad (2.6.65)$$

$$A_n = \frac{2 u_0 \left(\omega_1^2 - \frac{k}{\sigma l} \right)}{\lambda_n^2 I_1^2(\lambda_n)} [2 I_2(\lambda_n) - \lambda_n I_1(\lambda_n)], \quad (2.6.66)$$

$$B_n = \frac{2 u_0 \omega_1}{\lambda_n I_1^2(\lambda_n)} \left[\frac{\beta}{\sigma} I_1(\lambda_n) - 4\nu \frac{\lambda_n^2}{\rho^2} I_1(\lambda_n) - 2 \frac{\beta}{\sigma} I_2(\lambda_n) \right]. \quad (2.6.67)$$

Ввиду (2.6.60) и решая уравнение

$$T_n''(t) + \left[\gamma \left(\frac{\lambda_n^2}{\rho} \right) + \frac{\beta}{\sigma} \right] T_n'(t) + \frac{k}{\sigma t} T_n(t) = a_n \sin(\omega_1 t + \xi_n), \quad (2.6.68)$$

$$T_n(0) = \frac{8\sigma\rho^2}{\lambda_n^3 I_1(\lambda_n)}, \quad T_n'(0) = -\frac{2u_0\omega_1}{\rho^5 \lambda_n I_1(\lambda_n)}, \quad (2.6.69)$$

найдем в случае затухающих колебаний (т.е. в случае комплексных корней) для $U(r, t)$:

$$\begin{aligned} U^I(r, t) & \sum_{n=1}^{\infty} I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) e^{-h_n t} \left[\left\{ \frac{h_n}{P_n} T_n(0) - \right. \right. \\ & - \frac{h_n}{P_n} N_n^* \sin(\xi_n + \delta_n) + \frac{1}{P_n} T_n'(0) - \frac{\omega_1}{P_n} N_n^* \cos(\xi_n + \delta_n) \left. \right\} \times \\ & \times \sin P_n t + \{ T_n(0) - N_n^* \sin(\xi_n + \delta_n) \} \cos P_n t \Big] + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) N_n^* \sin[(\omega_1 t) + \xi_n + \delta_n] + \frac{r^2}{\rho^2} u_0 \sin \omega_1 t, \\ U^I(r, t) & = \sum_{n=1}^{\infty} I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) e^{-h_n t} \left[\left\{ \frac{h_n}{P_n} T_n(0) - \right. \right. \\ & - \frac{h_n}{P_n} N_n^* \sin(\xi_n + \delta_n^*) - \frac{h_n}{P_n} N_n \sin(\varphi_0 + \delta_n) + \\ & + \frac{1}{P_n} T_n'(0) - \frac{\omega_1}{P_n} N_n^* \sin(\xi_n + \delta_n^*) - \frac{\omega_0}{P_n} N_n \cos(\varphi_0 + \delta_n) \left. \right\} \times \\ & \times \sin P_n t + \{ T_n(0) - N_n^* \sin(\xi_n - \delta_n^*) - N_n \sin(\varphi_0 + \delta_n) \} \times \\ & \times \cos P_n t \Big] + \sum_{n=1}^{\infty} I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) [N_n^* \sin(\omega_1 t + \xi_n + \delta_n^*) + \\ & + N_n \sin(\omega_0 t + \delta_n + \varphi_0)] + \frac{r^2}{\rho^2} u_0 \sin \omega_1 t. \quad (2.6.70) \end{aligned}$$

Здесь N_n , $tg \delta_n$, P_n , ξ_n , h_n , $T_n(0)$, $T_n'(0)$, N_n^* и δ_n^* определены раньше. Асимптотика решения имеет вид

$$\begin{aligned} u(r, t)_{t \rightarrow \infty} & \sim \sum_{n=1}^{\infty} I_0\left(\frac{\lambda_n}{\rho} r\right) [N_n^* \sin(\omega_1 t + \xi_n + \delta_n^*) + \\ & + N_n \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \delta_n)] + \frac{r^2}{\rho^2} U_0 \sin \omega_1 t. \quad (2.6.71) \end{aligned}$$

Спектр резонансных частот, являясь свойством самой системы и не завися от характера воздействия, естественно, тот же.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Фомин. Шар в поле витка с током, ЖТФ, XXXIII, № 9, 1021—1030, (1963).
2. Ф. М. Морс и Г. Фешбах. Методы теоретической физики, 2. М., ИЛ, 1960, 794, 805.
3. А. В. Донской, А. А. Фомин. Электрические параметры электромагнитных систем при индукционном нагреве шара. «Электричество», 1965, № 4, 68—70.
4. В. Г. Болтин, В. В. Смирнов. К расчету индуктора для нагрева шара. Промышленное применение токов высокой частоты, вып. 10, 1969, 64—69.
5. В. П. Матвеев, В. Н. Милявская. Электродинамические явления в электромагнитной системе индуктор-капля при производстве микропровода в стеклянной изоляции. — В сб. Достижения в области разработки, производства и применения микропровода в стеклянной изоляции. М., ЦИТИ — Электропром, 1962, 4—54.
6. Р. П. Жежерин. Проблема «электромагнитного тигля». Вопросы магнитной гидродинамики и динамики плазмы. Рига, Изд. АН ЛатвССР, 1959, 279—294.
7. А. Ф. Найденов. Проблема увеличения количества тяжелой проводящей жидкости, удерживаемой в электромагнитном тигле. Вопросы магнитной гидродинамики. Рига, Изд. АН ЛатвССР, 1963, 327—337.
8. Т. Ф. Волков. Устойчивость тяжелой проводящей жидкости, удерживаемой быстропеременным магнитным полем. ЖТФ, XXXII, № 1, 34—43, (1962).
9. А. А. Фогель, Т. А. Сидорова. Плавка металла во взвешенном в электромагнитном поле состоянии. Промышленное применение токов высокой частоты, вып. 8. Л., «Машиностроение», 1967, 76—84.
10. Т. А. Сидорова. Силовые и энергетические соотношения в электромагнитном тигле. Промышленное применение токов высокой частоты. М.—Л., «Машиностроение», 1964, 266—269.
11. А. А. Фогель. Бестигельная плавка металлов в вакууме или в атмосфере инертного газа. Применение вакуума в металлургии. М., Изд-во АН СССР, 1960, 279—289.
12. А. Ф. Найденов. Об увеличении веса жидкого металла, удерживаемого во взвешенном состоянии переменным магнитным полем. Промышленное применение токов высокой частоты. М.—Л., «Машиностроение», 1964, 257—266.
13. А. Фогель. Индукционный способ бестигельной плавки металлов. «Вестник электропромышленности», 31, № 4, 1960, 16—20.
14. А. А. Фогель, Т. Ф. Найденов, Т. А. Сидорова, И. В. Коркин. Трудности, возникающие при увеличении веса расплавленного металла, удерживаемого во взвешенном в электромагнитном поле состоянии. Промышленное применение токов высокой частоты. М.—Л., «Машиностроение», 1964, 249—257.
15. В. А. Шпирнов. Форма жидкой капли при получении остеклованного микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 11, «Карта Молдовеняскэ». Кишинев, 1964, 22—26.
16. И. М. Кирко, А. Э. Микельсон. Об устойчивости свободного парения капли жидкого металла в переменном магнитном поле. Вопросы магнитной гидродинамики и динамики плазмы. Рига, Изд-во ЛатвССР, 1962.
17. М. А. Дивильковский. Задача о шаре, помещенном в однородное переменное магнитное или электрическое поле. ЖТФ, 9, вып. 5, 433, (1939).
18. В. К. Бояришинов. Магнитное поле системы индуктор-расплав для процесса литья медного микропровода в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966.
19. А. С. Васильев, В. П. Стрельников. Расчет индуктора для литья микропровода. Промышленное применение токов высокой частоты. Труды ВНИИТВЧ, вып. 10. Л., «Машиностроение», 1969.
20. В. П. Стрельников. Способ измерения сопротивлений индукторов при высоких частотах. Промышленное применение токов высокой частоты. Труды ВНИИТВЧ. Л., «Машиностроение», 1969, 100—103.
21. В. И. Заборовский, С. К. Зотов, Л. П. Менчиков. О существующих предпосылках регулирования параметров микропровода в процессе литья. Микропровод

- и приборы сопротивления, вып. 4. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 152—62.
22. С. К. Зотов, А. М. Марютин, И. А. Нестеровский, И. Г. Силькис. О некоторых магнетогидростатических условиях получения микропроводов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 8. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1971, 9—16.
 23. В. В. Трояновский. Развитие метода изготовления сверхтонких проволок непосредственно из жидкого металла. Достижения в области разработки, производства и применения микропровода в стеклянной изоляции. М., ЦИТИ—Электропром, 1962, 15—21.
 24. Ю. В. Чугаевский. Об одной аппроксимированной гидродинамической модели капли. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 3. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965, 16—27.
 25. Исследование физических основ технологии литья микропровода из сплавов сопротивления. Научно-технический отчет КНИИЭП, 1965.
 26. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М., ГИТТЛ, 1954.
 27. В. П. Стрельников. О возможности расчета поверхности капли и основных параметров индуктора при литье микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 8. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1971, 24—30.
 28. В. В. Трояновский. Геометрические размеры тигля и конуса растягивания. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 8. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1971, 277—284.
 29. В. К. Бояршинов. Динамика получения микропровода в стеклянной изоляции. Электронная техника, серия Радиокomпоненты, вып. 2, 1968, 107—116.
 30. Ю. В. Чугаевский. О критерии вхождения металла в капилляр в условиях литья микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 3. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965, 27—31.
 31. В. Г. Чебан, Ю. В. Чугаевский. Свободные колебания столба ньютоновской жидкости, герметизированной мембранами. Изв. АН МССР, 1966, № 4, 97—100.
 32. В. Г. Чебан, Ю. В. Чугаевский. Вынужденные колебания столба ньютоновской жидкости, герметизированной мембранами. Матем. исслед. т. II, вып. 1. Кишинев, РИО АН МССР, 1967, 101—110.
 33. Н. А. Слезкин. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М., ГИТТЛ, 1955.
 34. Э. Камке. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М., ИЛ, 1951.
 35. Г. Н. Ватсон. Теория бесселевых функций. т. 1, М., ИЛ, 1949.
 36. В. И. Смирнов. Курс высшей математики, 2. М., Гостехтеориздат, 1958.

ГЛАВА III

ТЕРМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОПРОВОДА

Тепловой режим литья микропровода существенно влияет на формирование его свойств. Прогресс в области исследования физических основ процесса микролитья в капилляр непосредственно связан с детальным и обстоятельным выяснением существа тепловых режимов литья, а также с созданием хотя бы приближенной теории этих режимов. В исследовании термических основ формирования микропровода можно выделить два главных вопроса: тепловые явления в расплаве капли, находящейся в высокочастотном магнитном поле индуктора, и тепловой режим охлаждения самого микропровода.

Теорию тепловых явлений, характеризующих процесс микролитья, можно построить на базе решения уравнения теплопроводности для различных частей системы: питающий стержень — стеклянная трубка, расплав металла и размягченное стекло в зоне индуктор — микропровод. Интеграл θ уравнения теплопроводности представляет собой функцию многих переменных [1, 2]:

$$\theta = \theta(L, \tau, \lambda, c, \rho, \omega, \psi), \quad (I)$$

где θ — функция перегрева системы, L — совокупность пространственных координат различных точек системы, τ — время, λ , c , ρ — коэффициент теплопроводности, теплоемкость, удельный вес тела, ω — плотность действующих тепловых источников, ψ — набор теплофизических параметров среды

$$\theta(L, \tau) = t(L, \tau) - t_0. \quad (II)$$

t_0 — температура среды, а $t(L, \tau)$ описывает температурное поле системы.

В общем случае теплофизические свойства материалов являются некоторыми функциями температуры. Поэтому каждая точка системы

обладает своим собственным набором значений λ , c , ρ . Однако непосредственный учет изменений теплофизических параметров системы и среды при переходе от одной точки к другой значительно усложняет дифференциальные уравнения теплопроводности. В то же время, как показали работы профессора Г. Н. Дульнева [3, 4], учет этих зависимостей без ущерба для точности и физической стороны вопроса может быть произведен при вычислении температуры по окончательным формулам для температурного поля системы методом последовательных приближений [5].

Таким образом, в большинстве случаев при решении уравнений теплопроводности, теплофизические параметры системы считаются постоянными, т. е. не зависящими от координат и температуры. Но вместо истинных значений теплоемкости, теплопроводности и удельного веса будем пользоваться усредненными, вычисляемыми по формуле

$$\bar{a}_i = \frac{\int a_i dL d\tau}{\int dL d\tau}. \quad (III)$$

§ 1. Нагрев капли при литье микропровода

Тепловой режим капли расплава исследовался в [6—9]. В первом приближении считалось, что расплавленная капля имеет форму шара и выделяемое в ней тепло равномерно распределяется по всему объему. Тогда средняя температура перегрева капли определится выражением [1]

$$\bar{\theta}_k = \frac{1}{15} \cdot \frac{Wr_k^2}{\lambda_k} \left(1 + \frac{5\lambda_k}{\alpha_k r_k} \right), \quad (3.1.1)$$

где r_k — эффективный радиус капли, α — коэффициент ее теплоотдачи. Простая модель, из которой получено соотношение (3.1.1) [7], не позволяет, однако, найти распределение температуры по высоте расплава. Как отмечается в [9], только в небольшом объеме капли, где происходит интенсивное перемешивание металла, температура с достаточной степенью точности сохраняется постоянной, близкой к средней температуре перегрева θ_k . В то же время можно предположить, что значительное отклонение от этой температуры наблюдается в верхней и нижней частях капли. При этом на перегрев верхней части существенно влияние оказывает либо соприкосновение с питающим стержнем, либо теплообмен с внутренней полостью стеклянной трубки. Что касается нижней части капли, то здесь сказывается прежде всего резкая неоднородность электромагнитного поля индуктора.

Для температурного поля нижней части капли в [9] предложена методика приближенного расчета, аналогичная методике Л. С. Эйгенсона расчета температурного поля луковичи при формировании стек-

лянного волокна [10]. Разбивая нижнюю часть капли горизонтальными сечениями на k элементов, получим, что для любого k -того элемента уравнение теплового баланса имеет вид

$$q_k + \frac{\lambda}{\varepsilon} S_{k-1} (t_{k-1} - t_k) = \frac{\lambda}{\varepsilon} (t_k - t_{k+1}) + \varepsilon \sigma S_{\delta k} T_k^4 + \alpha S_{\delta k} (t_k - t_0), \quad (3.1.2)$$

где q_k — тепловая мощность, выделяемая в k -том элементе, S_{k-1} и S_{k+1} — площади горизонтальных сечений k -того элемента в нижней и верхней части, $S_{\delta k}$ — площадь боковой поверхности элемента, ξ — его высота, T_k — абсолютная температура, ε — степень черноты, δ — постоянная Стефана—Больцмана. Полученная система уравнений замыкается, если принять, что для последнего элемента температура равна заданной, например, средней температуре капли. При этих предположениях система (3.1.2) была решена в [9] методом последовательных приближений для участка капли высотой 3 мм, который разбивался на шесть частей. Рассчитанные температурные поля для процесса литья медного микропровода представлены рис. 33. В [9] тоже было произведено экспериментальное измерение распределения температуры по высоте капли при литье медного микропровода, результаты которого приведены на рис. 34. При этом измерялась яркостная температура S_T оптическим пирометром ОППИР-017, а вычисление абсолютной температуры производилось по формуле

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{S_T} + \frac{\lambda'}{c_2} \ln \varepsilon_\lambda, \quad (3.1.3)$$

где $\lambda' = 6,5 \cdot 10^{-5}$ см, c_2 — вторая константа излучения, равная 1,43879 см·град, $\varepsilon_\lambda = 0,2$ по измерениям [9].

При рассмотрении верхней части капли наиболее интересен вопрос о влиянии геометрии питающего стержня на температуру капли [7]. В первом приближении можно допустить, что температура в месте контакта металлического прутка и расплавленной капли не меняется в процессе литья. Тогда задачу о нагреве металлического прутка мож-

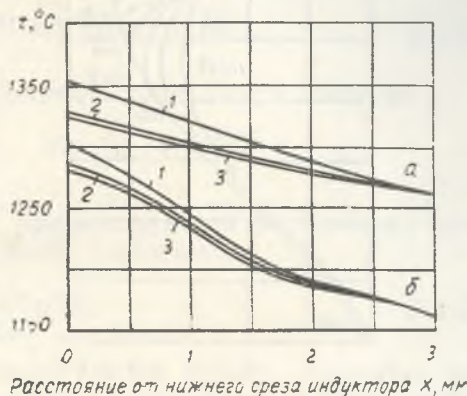


Рис. 33. Зависимость температуры металла нижней части капли от высоты (цифры у кривых — номера приближений): а — масса капли 6 г; б — масса капли 4 г

но сформулировать, как задачу о нагреве полубесконечного цилиндрического стержня без теплоизоляции боковой поверхности, один конец которого в течение всего процесса теплообмена поддерживается при заданной постоянной температуре перегрева θ_k . Ввиду того, что $d \ll l$

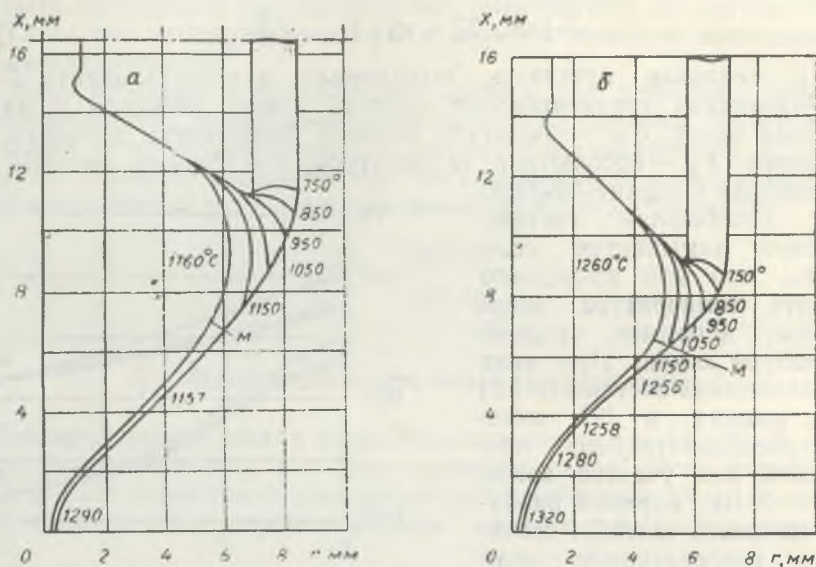


Рис. 34. Температурное поле капли при литье медного микропровода (M — граница металла со стеклом):
 а — масса капли 4 г; б — масса капли 6 г

и λ велико, радиальным распределением температуры в прутке можно пренебречь [7]. Тогда дифференциальное уравнение теплопроводности и краевые условия следующие:

$$\frac{\partial^2 \theta(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{2a}{c\rho R_{II}} \theta(x, \tau). \quad (3.1.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta(x, 0) &= 0, \\ \theta(0, \tau) &= \theta_k, \\ \theta(\infty, \tau) &= 0, \\ \frac{\partial \theta(\infty, \tau)}{\partial x} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3.1.5)$$

где a — коэффициент температуропроводности, R_{II} — радиус прутка. Решение поставленной задачи известно из [1]:

$$\theta = \frac{1}{2} \theta_k \left[e^{-\sqrt{\frac{2x}{\lambda R_n}} x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \sqrt{\frac{2a\tau}{\lambda R_n}} \right) + e^{\sqrt{\frac{2x}{\lambda R_n}} x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \sqrt{\frac{2a\tau}{\lambda R_n}} \right) \right]. \quad (3.1.6)$$

Плотность теплового потока q , идущего от капли к стержню, определится из выражения

$$q = \frac{2\lambda\theta_k}{R_n} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi Fo}} e^{-Mi} + \sqrt{Bi} \operatorname{erf} \sqrt{Mi} \right], \quad (3.1.7)$$

где Fo , Bi , Mi — безразмерные критерии Фурье, Био и Михеева

$$Fo = \frac{4a\tau}{R_n^2}, \quad Bi = \frac{\alpha R_n}{2\lambda}, \quad Mi = Bi \cdot Fo = \frac{2\alpha a\tau}{\lambda R_n}.$$

При $\tau \rightarrow \infty$ (стационарный режим, соответствующий постоянному контакту капли с прутком) уравнение (3.1.7) упрощается:

$$q = \frac{2\lambda\theta_k}{R_n} \sqrt{Bi}. \quad (3.1.8)$$

Полный поток тепла Q , передаваемый каплей прутку, находится интегрированием (3.1.8) по τ и по площади поперечного сечения прутка

$$Q = \int q d\tau dS = k \theta_k \tau R^{3/2}, \quad (3.1.9)$$

где k — некоторый числовой коэффициент. Для того чтобы учесть изменение теплоотвода с поверхности капли, вызванное наличием теплового контакта с металлическим прутком, введем эффективный коэффициент теплоотдачи капли α'_k , который находится из соотношения

$$Q + \alpha_k \theta_k \tau (S_k - S) = \alpha'_k \theta_k S_k \tau. \quad (3.1.10)$$

В (3.1.10) левая часть представляет собой суммарное количество тепла, отводимое от поверхности капли конвекцией и лучеиспусканием, а также через металлический пруток. Находим

$$\alpha'_k = \frac{Q}{\theta_k S_k \tau} + \frac{\alpha_k (S_k - S)}{S_k}.$$

В соответствии с (3.1.1) находим, что максимальное понижение температуры капли при наличии питающего стержня определяется уравнением

$$\frac{\bar{\theta}_k'}{\theta_k} = \frac{1 + \frac{5\lambda}{R_n^2 \left(\sqrt{\frac{2\alpha\lambda}{R_n} - \alpha_k} \right) + r_k \alpha_k}}{1 + \frac{5\lambda}{r_k \alpha_k}} \quad (3.1.11)$$

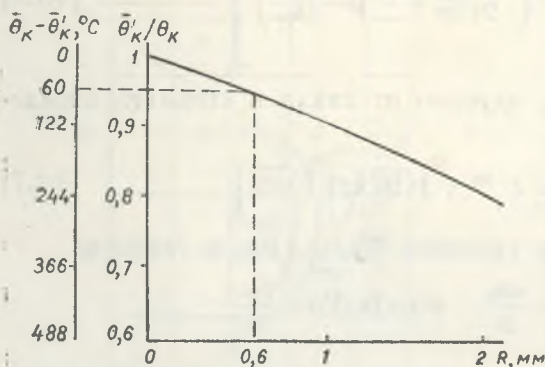


Рис. 35. Теоретическая зависимость понижения температуры капли от радиуса прутка

Расчет по формуле (3.1.11) для марганца с диаметром капли 8 мм и температурой микрованны 1220°C показывает, что при изменении диаметра прутка от 2 до 6 мм температура микрованны снижается по сравнению с капельным процессом на 10—35% (рис. 35).

§ 2. Квазистационарная кристаллизация микропровода в однородной среде

Основные уравнения задачи. Рассмотрим квазистационарную задачу о кристаллизации микропровода в процессе литья. Пусть из расплавленной массы непрерывно вытягивается с постоянной скоростью v жидкий стержень радиуса R . Будем считать, что в течение всего процесса вытягивания радиус стержня не изменяется. Примем начало координат в основании расплавленной массы, ось x направим вертикально вниз и предположим, что при $x=0$ температура поддерживается постоянной и равной T_k . Предположим также, что критерий Био для стержня весьма мал (порядка 10^{-4}), поэтому радиальным изменением температуры можно пренебречь [10—12]. Лучистый теплообмен учитываем при вычислении коэффициента теплоотдачи по методике [3].

Пусть в некотором сечении движущегося микропровода, определяющегося температурой $T_{пл}$ и координатой $x=l$, происходит экзотермический фазовый переход, характеризующийся выделением скрытой теплоты плавления γ . Сечение $x=l$ отличается постоянством тем-

пературы в течение всего процесса вытягивания и разбирает рассматриваемый стержень на две части, взаимодействующие в тепловом отношении. Микропровод находится в среде с постоянной температурой T_0 , которая и принята за начало отсчета температур. Теплообмен между движущимся микропроводом и внешней средой происходит по закону Ньютона, т. е. тепловой поток с единицы стержня в окружающую среду определяется выражением

$$q = \alpha T(x), \quad (3.2.1)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, $T(x)$ — температура микропровода. Составим уравнение теплового баланса для элемента длины микропровода, заключенного между сечениями с координатами x и $x+dx$. Вследствие теплопроводности в указанный элемент поступает количество тепла, равное

$$\begin{aligned} & \left(-\lambda F \frac{dT}{dx}\right)_x - \left(-\lambda F \frac{dT}{dx}\right)_{x+dx} = -\lambda F \frac{dT}{dx} - \\ & - \left(-\lambda F \frac{dT}{dx} - \lambda F \frac{d^2T}{dx^2} dx\right). \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

Из-за движения к рассматриваемому элементу подводится количество тепла

$$(c\rho v FT)_x - (c\rho v FT)_{x+dx} = c\rho v FT - \left(c\rho v FT + c\rho v F \frac{dT}{dx}\right). \quad (3.2.3)$$

В стационарном режиме сумма этих теплот должна полностью рассеиваться во внешнюю среду. Следовательно,

$$\left(\lambda F \frac{d^2T}{dx^2} - c\rho v F \frac{dT}{dx}\right) dx = \alpha U T dx, \quad (3.2.4)$$

λ , c , ρ — коэффициент теплопроводности, теплоемкость и удельный вес материала жилы, которые здесь и в дальнейшем приняты постоянными либо кусочно-постоянными; U — периметр, а F — площадь сечения стержня. После простых преобразований находим окончательную форму дифференциального уравнения для функции T ;

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{v}{a} \frac{dT}{dx} - S^2 T = 0, \quad (3.2.5)$$

где

$$S^2 = \frac{2\alpha}{\lambda R}, \quad (3.2.6)$$

в случае цилиндрической жилы $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ — температуропроводность. Так как стержень состоит из двух частей — жидкой и твердой — то уравнение (3.2.3) надо интегрировать в двух областях, каждая из ко-

торых может обладать своим набором теплофизических постоянных. Поэтому граничные условия формулируются следующим образом. У нижнего основания расплава при $x=0$

$$T_1 = T_k > T_{пл}. \quad (3.2.7)$$

На изотермической границе фазового перехода при $x=l$ сохраняется непрерывность температур

$$T_1(l) = T_2(l) \quad (3.2.8)$$

и вследствие выделения скрытой теплоты затвердевания, равной $\rho\sigma\gamma$ в пересчете на единицу площади за единицу времени, уравнение теплового баланса имеет вид

$$\lambda_1 \frac{dT_1}{dx} - \lambda_2 \frac{dT_2}{dx} = \rho\sigma\gamma. \quad (3.2.9)$$

Наконец, при $x \rightarrow \infty$

$$T_2 \rightarrow 0. \quad (3.2.10)$$

Нижний индекс относит соответствующие величины к жидкой или твердой области стержня, а ρ характеризует жидкость. Таким образом, задача формулируется так: найти функции $T_1(x)$, $T_2(x)$ и границу раздела фаз, удовлетворяющие в лабораторной системе координат (λ -системе), относительно которой стержень находится в движении, уравнению (3.2.5) и краевым условиям (3.2.7)—(3.2.10).

Переход к подвижной системе координат, в которой имеет место традиционное уравнение нестационарной теплопроводности, осуществляется при помощи замены переменных:

$$\xi = x - v\tau, \quad (3.2.11)$$

где ξ — подвижная координата, а τ — время. И так как в этих координатах верхняя ($x=0$) и нижняя ($x=l$) границы жидкой фазы будут двигаться со скоростью $-v$, а длина области остается инвариантной, то исходная система уравнений не сведется таким преобразованием к обычной задаче Стефана.

При учете стеклянной изоляции величина S^2 определяется соотношением

$$S^2 = \frac{4\beta D}{\lambda d^2}, \quad (3.2.6a)$$

где

$$\beta = \frac{2\lambda_{из}\alpha_{из}}{\alpha_{из} D \ln \frac{D}{d} + 2\lambda_{из}}$$

D и d — внешний диаметр изоляции и диаметр жилы соответственно, а индекс «из» относит величины к стеклянной изоляции.

В дальнейшем, если это не будет особо оговариваться, будем подразумевать, не нарушая общности, что в уравнении (3.2.5) может фигурировать либо величина (3.2.6), либо (3.2.6а).

Температурные поля [14]. Положим теплофизические параметры обеих фаз стержня одинаковыми, для чего усредним их. Хотя это и грубое приближение, однако оно находит свое оправдание в сравнительной простоте получающихся уравнений, а также в возможности до конца провести вычисления в аналитическом виде. Кроме того такое приближение позволяет сделать ряд важных качественных заключений о физической стороне процесса. Для обыкновенного дифференциального уравнения (3.2.5) в первой области характеристическое уравнение

$$r^2 - \frac{v}{a}r - S^2 = 0 \quad (3.2.12)$$

имеет корни

$$\begin{aligned} k &= \frac{v}{2a} + \left(\frac{v^2}{4a^2} + S^2 \right)^{1/2}, \\ \varepsilon &= \frac{v}{2a} - \left(\frac{v^2}{4a^2} + S^2 \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (3.2.13)$$

Отсюда находим два независимых частных интеграла e^{kx} и $e^{\varepsilon x}$, следовательно, общее решение

$$T_1 = A e^{kx} + B e^{\varepsilon x}. \quad (3.2.14)$$

Так как при переходе через фронт кристаллизации уравнение (3.2.5) не меняет своего вида, то его решение во второй области может отличаться только постоянными коэффициентами при экспоненциальных множителях. Поэтому

$$T_2 = D e^{kx} + C e^{\varepsilon x}. \quad (3.2.15)$$

Ввиду $\kappa > 0$, и $\varepsilon < 0$ из условия (3.2.10) сразу находим $D = 0$. Подчиним решения (3.2.14) и (3.2.15) граничным условиям. Это дает систему линейных алгебраических уравнений первого порядка, решая которую, находим

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\rho v \gamma}{2 \lambda g \exp(kl)}, \quad B = T_{\kappa} - \frac{\rho v \gamma}{2 \lambda g \exp(kl)} \\ C &= \frac{\exp(kl) - \exp(\varepsilon l)}{\exp(k + \varepsilon)l} \cdot \frac{\rho v \gamma}{2 \lambda g} + T_{\kappa}, \end{aligned} \right\} \quad (3.2.16)$$

где $g = \left(\frac{v^2}{4a^2} + S^2 \right)^{1/2}$. Таким образом, окончательно получаем

$$T_1 = \frac{\rho v \gamma}{2 \lambda g} [\exp(x-l)k - \exp(\varepsilon x - kl) + T_{\kappa} \exp(\varepsilon x)], \quad (3.2.14, a)$$

$$T_2 = \frac{\rho v \gamma}{2 \lambda g} \cdot \frac{\exp(kl) - \exp(\epsilon l)}{\exp(kl)} \cdot \exp \epsilon (x - l) + T_k \exp(\epsilon x). \quad (3.2.15, a)$$

Выражения (3.2.14а) и (3.2.15а) дают квазистационарное распределение температур по длине движущегося микропровода в системе координат, неподвижной относительно расплавленной массы. Замечая, что $x = vt$, эти соотношения можно также записать в терминах времени. В таком случае получим изменение температуры некоторого элементарного объема во времени.

Оценим порядок величин, входящих в эти соотношения. Обычно для металлов коэффициент температуропроводности есть величина порядка 0,1—0,5 м²/час. Скорость вытягивания микропровода примем в среднем равной $15 \cdot 10^3$ м/час. Величина S для стержней диаметра 5—30 мк имеет порядок 10^3 1/м. Следовательно, в практически интересных случаях вытягивания тонких нитей $S^2 \ll \frac{v^2}{4a^2}$. Поэтому показатели экспонент преобразовываются следующим образом:

$$\frac{v}{2a} - \left(\frac{v^2}{4a^2} + S^2 \right)^{1/2} \rightarrow -\frac{v}{2a} \cdot \frac{2a^2 S^2}{v^2} = -\frac{aS^2}{v}, \quad (3.2.17)$$

$$\frac{v}{2a} + \left(\frac{v^2}{4a^2} + S^2 \right)^{1/2} \rightarrow \frac{v}{a} + \frac{aS^2}{v}. \quad (3.2.18)$$

В работе [10], в которой исследуется охлаждение движущихся стеклянных лент, цилиндров и труб в процессе производства, показано, что (3.2.17) соответствует такому режиму охлаждения изделия, когда передача тепла вдоль оси стержня посредством теплопроводности пренебрежимо мала по сравнению с передачей тепла вследствие его движения. Однако в нашем случае такая простая физическая интерпретация полученных соотношений уже не может иметь места, граничные условия (3.2.8) и (3.2.9) приводят к наличию возрастающей компоненты температуры в выражении (3.2.14а) и соответственно к соотношению (3.2.18). Физический смысл этого состоит в том, что передачей тепла теплопроводностью, вообще говоря, пренебречь нельзя: она является весьма актуальной в области (0, l).

Дело в том, что отвод тепла от границы фазового перехода ($x = l$) осуществляется в основном посредством теплопроводности. С математической точки зрения существование граничных условий (3.1.8) и (3.1.9) означает, что задача о кристаллизации движущегося стержня в общем случае не может быть разделена на две самостоятельные задачи в интервалах (0, l) и (l, ∞).

Заметим, что в том случае, когда γ весьма мало, а температурные градиенты велики и правой частью уравнения (3.1.9) можно пренебречь, оно, по существу, вырождается в условие непрерывности теплового потока на границе двух соприкасающихся стержней. В таком

случае у нас имеется лишь одна неизвестная температура T , которая определяется из формулы

$$T = T_k \exp(\varepsilon x). \quad (3.2.19)$$

При этом преобразование (3.2.17) имеет тот же смысл, что и в работе [10]. Учитывая, что $x = vt$, показатель экспоненты можно представить в виде $(-a S^2 \tau)$ и изменение во времени температуры некоторого сечения движущегося стержня не зависит от его скорости. Иными словами, при выполнении указанного выше неравенства тепловой режим движущегося стержня эквивалентен тепловому режиму неподвижного. На эту особенность обратил внимание Л. С. Эйгенсон в [10]. После кристаллизации стержня температурное поле продолжает оставаться актуальным в весьма небольшой области, порядка величины x_e , которую можно определить из условия снижения температуры на границе ее примерно в e раз. Следовательно,

$$x_e = \frac{v}{aS^2} + l \quad (3.2.20)$$

или

$$\tau_e = \tau_0 + \frac{1}{aS^2}, \quad (3.2.21)$$

где $\tau_0 = \frac{l}{v}$. Время τ_e следует понимать как «время релаксации» в том смысле, что при $\tau > \tau_e$ движущееся сечение стержня уже не меняет заметным образом своей температуры. В отличие от случая, приведенного в [15], здесь «время релаксации» пропорционально линейному размеру тела, а не его квадрату. При указанных выше значениях величин, входящих в формулы (3.2.20) и (3.2.21), получаем, что поле актуальных температур распространяется от фронта кристаллизации на расстояние порядка 1 см. Это соответствует времени охлаждения порядка 2 мсек.

Вернемся к полученному распределению температур (3.2.14а) и (3.2.15а). При $v \rightarrow 0$ температурное поле не исчезает, но становится зависящим только от S . Наличие остаточного температурного поля связано с его стационарным характером и с бесконечностью стержня. Сама постановка задачи неявным образом предполагает, что стержень уже сформирован и на него воздействует приложенная к нулевому концу температура. Нарастание v деформирует температурное поле и приводит к значительному росту температурного градиента.

При $v \rightarrow 0$ аннулируется правая часть уравнения (3.2.9). Вследствие этого фазовый переход на границе $x = l$ отсутствует. В таком случае при $v \rightarrow 0$ стержень будет существовать в виде двух несмешивающихся фаз, находящихся в тепловом и фазовом равновесии. Таким образом, движение стержня является основным условием его кристал-

лизации, следовательно, характер и особенности его определяют саму кристаллизацию и его докристаллизационный тепловой режим.

Положение фронта фазового перехода [16]. Перейдем к определению координаты фронта кристаллизации. Условие

$$T_1(l) = T_2(l) = T_{пл} \quad (3.2.8a)$$

дает

$$1 + \left(\frac{2\lambda g T_{пл}}{\rho v \gamma} - 1 \right) \exp(2gl) - \frac{2\lambda g T_k}{\rho v \gamma} \exp(kl) = 0. \quad (3.2.22)$$

Прежде чем решить уравнение (3.2.22), разберем вопрос о числе его корней. Когда $2\lambda g T_{пл} > \rho v \gamma$ уравнение (3.2.22), вообще говоря, может иметь два корня. Как видно из рис. 36, корни уравнения являются точками пересечения графиков функций

$$y_1(l) = \left(\frac{2\lambda g T_{пл}}{\rho v \gamma} - 1 \right) \exp(2gl) - \frac{2\lambda g T_k}{\rho v \gamma} \exp(kl),$$

$$y_2(l) = -1. \quad (3.2.23)$$

Из рис. 36 следует, что при

$$y_1(0) < -1 \quad (3.2.24)$$

один корень уравнения (3.2.22) обязательно отрицателен. Требуя выполнения (3.2.24), приходим к условию

$$2\lambda g (T_{пл} - T_k) < 0, \quad (3.2.24a)$$

которое удовлетворяется во всех случаях, имеющих физический смысл. Из (3.2.24a) следует, что при $2\lambda g T_{пл} < \rho v \gamma$ и $T_k \neq T_{пл}$ уравнение (3.2.22) вообще не имеет положительных корней и задача, следовательно, лишается какого-либо физического содержания. В случае же $T_k = T_{пл}$ рассматриваемое уравнение имеет единственный корень, равный нулю. Неравенство

$$2\lambda g T_{пл} > \rho v \gamma, \quad (3.2.25)$$

выполняющееся для любых v , можно рассматривать как условие кристаллизации стержня. При $v=0$ из него следует тривиальное требование положительности тепловых параметров процесса. При $v \rightarrow \infty$ из (3.2.25) получаем

$$\lambda T_{пл} > \rho a \gamma \quad (3.2.26)$$

или, учитывая, что $a = \frac{\lambda}{c\rho}$, находим

$$T_{пл} > \frac{\gamma}{c}. \quad (3.2.27)$$

Последнее условие имеет глубокий физический смысл, который будет выяснен далее.

Переходим к решению (3.2.22). Из проведенного анализа следует, что трансцендентное уравнение (3.2.22) вполне однозначно определяет

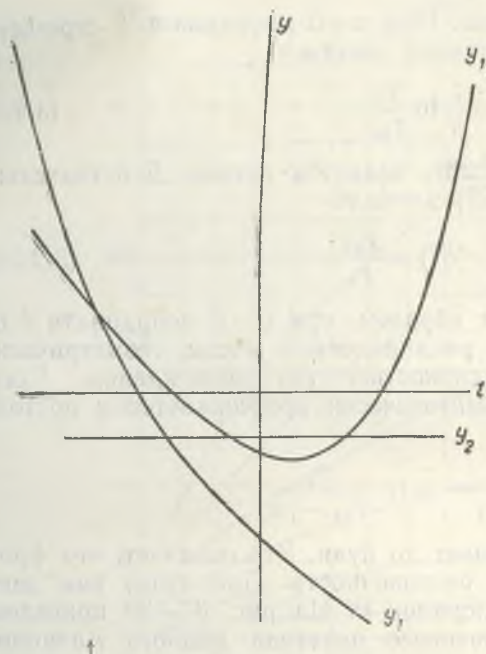


Рис. 36. Графический анализ количества корней уравнения (3.2.22)

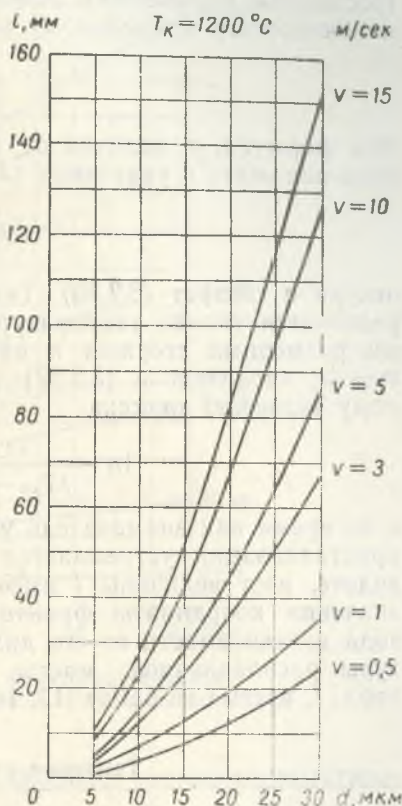


Рис. 37. Зависимость положения фронта кристаллизации от диаметра жилы медного микропровода

значение величины l . Поэтому могут быть построены, в принципе, непрерывные зависимости координаты фронта кристаллизации от параметров, определяющих процесс охлаждения стержня. Уравнение (3.2.22) не может быть решено точно, однако, как показывают вычисления, на практике можно ограничиться первым приближением для его решения. При этом в первом приближении решаем укороченное уравнение

$$2gl + \ln \frac{2\lambda g T_{пл} - \rho v \gamma}{\rho v \gamma} = kl + \ln \frac{2\lambda g T_k}{\rho v \gamma}, \quad (3.2.28)$$

из которого находим

$$l = \frac{1}{g - \frac{v}{2a}} \ln \frac{2\lambda g T_k}{2\lambda g T_{пл} - \rho v \gamma}. \quad (3.2.29)$$

Исследуем полученный результат. При $v \rightarrow 0$ координата l стремится к некоторому предельному значению, равному

$$l_0 = \frac{1}{S} \ln \frac{T_k}{T_{пл}}. \quad (3.2.30)$$

Эта формула, в отличие от (3.2.28), является точной. Действительно, если положить в уравнении (3.2.22) $v=0$, то

$$\exp(-Sl) = \frac{T_{пл}}{T_k}, \quad (3.2.22a)$$

откуда и следует (3.2.30). Таким образом, при $v \rightarrow 0$ координата l определяется только температурой расплавленной массы, геометрическими размерами стержня и интенсивностью его охлаждения. Когда $v \rightarrow \infty$, числитель в (3.2.29) асимптотически приближается к постоянному значению порядка

$$\ln \frac{\lambda T_k}{\lambda T_{пл} - a\rho\gamma} = \ln \frac{T_k}{T_{пл} - \gamma/c},$$

в то время как знаменатель убывает до нуля. Это означает, что фронт кристаллизации устремляется в бесконечность. При этом, как легко видеть, рост величины l имеет порядок v . На рис. 37—39 приведены значения координаты фронта фазового перехода медного микропровода в зависимости от его диаметра, скорости вытягивания и температуры расплавленной массы. В основу расчета положены данные табл. 1, взятые из работ [17, 18].

Таблица 1

Тепловые постоянные меди воздуха

Материал, среда	$T_{пл}$, °C	λ , $\frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$	a , $\frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$	ρ , $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	γ , $\frac{\text{кал}}{\text{г}}$	γ_1 , $\frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$
медь . . .	1080	0,92	1,144	8,93	51	—
воздух . .	—	$0,15 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	1,05

При этом коэффициент теплоотдачи вычислялся по формуле [19]

$$Nu = 0,52 Re^{0,47}. \quad (3.2.31)$$

Как и следовало ожидать, координата фронта кристаллизации сильно зависит от скорости вытягивания. Резко также выражена зависимость

величины l от диаметра получаемого стержня при постоянном коэффициенте теплоотдачи.

Любопытна связь между координатой изотермической границы фазового перехода и коэффициентом внутренней теплопроводности ма-

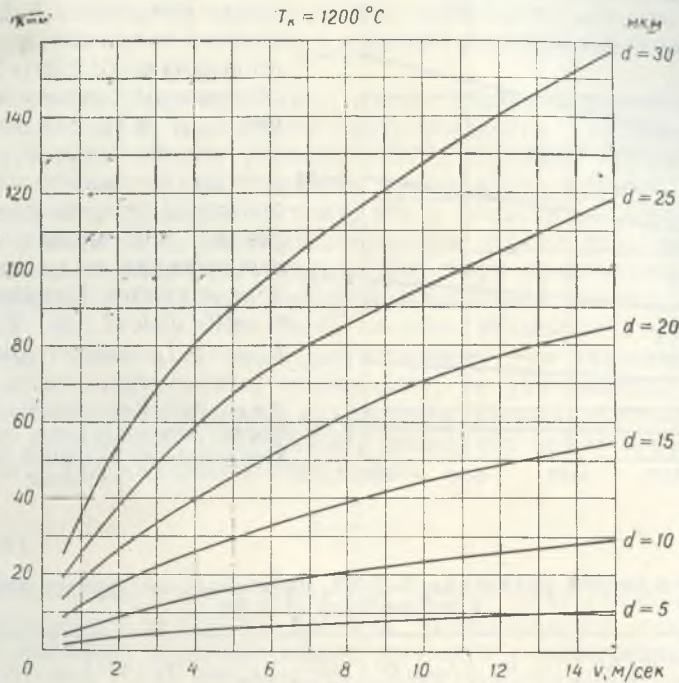
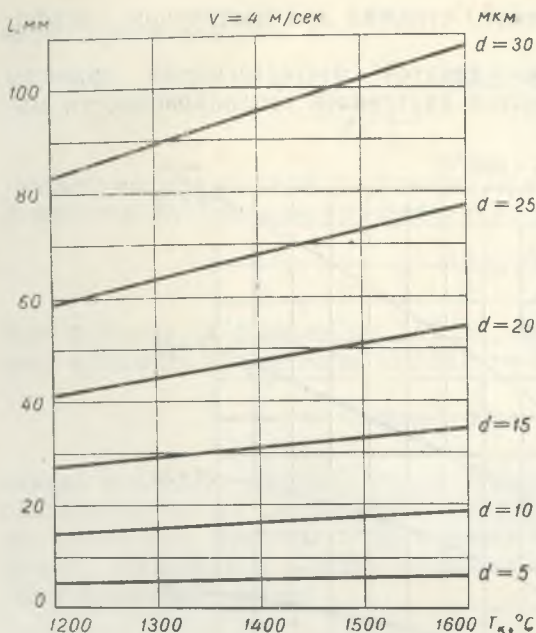


Рис. 38. Зависимость положения фронта кристаллизации от скорости вытягивания медного микропровода

териала λ . При $v \rightarrow 0$ имеем $l \sim \lambda^{1/2}$. При больших скоростях вытягивания l медленно убывает с ростом λ :

$$l = \psi(\lambda) \sim \ln \frac{f\sqrt{\lambda}}{b\sqrt{\lambda} - h}, \quad (3.2.32)$$

где b , f , h — числа очень большие по сравнению с λ , а при $v \rightarrow \infty$ координата l от λ практически не зависит. Для средних v , как показывают вычисления в [16], можно считать, что $l = \psi(\lambda) \sim \frac{1}{\lambda}$. В общем случае зависимость $l = \psi(\lambda)$ сложна и может быть аппроксимирована более простыми соотношениями только на чрезвычайно узких интервалах изменения λ .



Остановимся еще на границах применимости приближенной формулы (3.2.29). В табл. 2 для различных параметров процесса вытягивания приведены корни уравнения (3.2.22), найденные численным решением и по формуле (3.2.29). Эти корни обозначены соответственно через $l_{\text{числ.}}$ и l_a . Из табл. 2 видно, что значение l_a является плохим приближением для координаты фронта фазового перехода при малых скоростях вытягивания и малых диаметрах стержня. Однако уже при $v \geq 10$ см/сек и $T_k \geq 1500^\circ\text{C}$ $l_{\text{числ.}}$ и l_a достаточно близки,

Рис. 39. Зависимость положения фронта кристаллизации медного микропровода от исходной температуры расплава

Таблица 2

Сравнение корней уравнения (3.2.22), найденных численным решением и по формуле (3.2.29)

$v, \frac{\text{см}}{\text{сек}}$	$d, \text{мкм}$	$T_k, ^\circ\text{C}$	$l_a, \text{см}$	$l_{\text{числ.}}, \text{см}$	$v, \frac{\text{см}}{\text{сек}}$	$d, \text{мкм}$	$T_k, ^\circ\text{C}$	$l_a, \text{см}$	$l_{\text{числ.}}, \text{см}$
5	5	1200	0,039	0,012	10	20	1200	0,570	0,569
5	5	1500	0,075	0,063	10	20	1500	0,768	0,768
5	5	2000	0,121	0,115	10	20	2000	1,023	1,023
5	10	1200	0,112	0,0148	10	30	1200	1,122	1,122
5	10	1500	0,184	0,160	10	30	1500	1,147	1,147
5	10	2000	0,276	0,269	10	30	2000	1,921	1,921
5	20	1200	0,351	0,292	50	5	1200	0,165	0,165
5	20	1500	0,511	0,497	50	5	1500	0,219	0,219
5	20	2000	0,718	0,714	50	5	2000	0,289	0,289
5	30	1200	0,701	0,683	50	10	1200	0,514	0,514
5	30	1500	0,969	0,966	50	10	1500	0,661	0,661
5	30	2000	1,315	1,315	50	10	2000	0,850	0,850
10	5	1200	0,056	0,007	50	20	1200	1,532	1,532
10	5	1500	0,092	0,080	50	20	1500	1,948	1,948
10	5	2000	0,138	0,134	50	20	2000	2,484	2,484
10	10	1200	0,175	0,146	50	30	1200	2,874	2,874
10	10	1500	0,255	0,248	50	30	1500	3,643	3,643
10	10	2000	0,359	0,357	50	30	2000	4,634	4,634

а при $v \geq 50$ см/сек они практически совпадают. Таким образом, формула (3.2.29) является вполне пригодной для расчетов во всех практически интересных случаях литья.

Кривые рис. 37—39 получены для охлаждения микропровода в воздухе. При этом следует помнить, что они дают завышенные значения l вследствие того, что значения теплофизических констант в формуле (3.2.29) взяты по отношению к средней температуре микропровода в целом, т. е. явно занижены.

На практике при вытягивании микропровода применяется принудительное охлаждение с помощью струи жидкости. Грубый учет этого в рассматриваемой модели производится следующим образом: применение охлаждающей струи жидкости, температура которой поддерживается постоянной, приводит к тому, что в области ее действия коэффициент теплоотдачи α_2 резко увеличивается. Кроме того коэффициент теплоотдачи α_3 стержня, лежащего ниже струи кристаллизатора, также возрастает из-за наличия холодной жидкостной пленки. Поэтому в соотношении (3.2.29) должно быть введено некоторое «эффективное» значение $\alpha_{эф}$, равное среднему интегральному из указанных значений α . В этом приближении, естественно, не учитывается различная степень влияния интенсивности охлаждения разных участков стержня на значение координаты l . Из (3.2.29) видно, что при отличной от нуля скорости вытягивания приближенно имеем

$$l \sim \frac{1}{\alpha} \quad (3.2.33)$$

Переохлаждение жидкой фазы [20]. Фронт кристаллизации играет роль своеобразного теплового барьера. Необходимость отвода тепла от фронта фазового перехода может привести к понижению температуры в интервале $(0, l)$. В месте теплового стока температурная функция минимальна. Известно, что минимум функции типа температурной функции в $(0, l)$ определяется выражением

$$x_{\min} = \frac{1}{2g} \ln \left(-\frac{B\varepsilon}{Ak} \right), \quad (3.2.34)$$

так как k и ε имеют разные знаки, то необходимо, чтобы A и B были одного знака. Из (3.2.16) видно, что A всегда положительно. Условие $B > 0$ можно переписать в виде

$$1 - \frac{\rho v \gamma}{2 \lambda g T_k \exp(kl)} > 0. \quad (3.2.35)$$

Из выражения (3.2.25) видно, что $2 \lambda g T_{пл} > \rho v \gamma$. Следовательно, и $2 \lambda T_k g > \rho v \gamma$. А так как и $\exp(kl) \geq 1$, то дробь в (3.2.35) меньше единицы, значит требуемое неравенство выполнено. Таким образом, существование фронта кристаллизации $x=l$ влечет за собой выполнение неравенства (3.2.35).

Для существования теплового стока необходимо удовлетворить условие

$$0 < x_{\min} < l. \quad (3.2.36)$$

Из общих физических соображений ясно, что левая сторона неравенства (3.2.36) всегда выполняется. Действительно, в противном случае ($x_{\min} < 0$) температура внутри $(0, l)$ была бы монотонно возрастающей функцией координаты, что невозможно. Это можно показать и строго математически.

Условие невозрастания температуры внутри $(0, l)$ состоит в том, что производная температура вблизи $x=0$ должна быть отрицательной. Последнее записывается

$$-\frac{\varepsilon B}{kA} > 1. \quad (3.2.37)$$

А выражение (3.2.37) как раз эквивалентно левому неравенству (3.2.36). С учетом (3.2.34) это неравенство запишется так:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2g} \ln \left\{ \frac{\varepsilon}{k} \left[1 - \frac{2\lambda g T_k}{\rho v \gamma} \exp(kl) \right] \right\} < \\ & < \frac{1}{g - \frac{v}{2a}} \ln \cdot \frac{2\lambda g T_k}{2\lambda g T_{пл} - \rho v \gamma}. \end{aligned} \quad (3.2.38)$$

Выражая l в явном виде и пренебрегая единицей по сравнению с другим членом, что только усиливает неравенство, после небольших преобразований найдем

$$v > aS \sqrt{\frac{c T_{пл}}{\gamma \left(1 + \frac{\gamma}{c T_{пл}} \right)}}. \quad (3.2.39)$$

Полученная формула с точностью до постоянной S совпадает с выражением для предельной скорости, найденным Г. А. Остроумовым [21]. Как видно из (1.2.39), предельная скорость совершенно не зависит от граничной температуры расплавленной массы, а определяется только свойствами материала и интенсивностью теплообмена стержня со средой.

Учитывая закон конвективного теплообмена одиночного цилиндра в форме $Nu = B Re^m$ (где B — константа), неравенству (3.2.39) можно придать вид

$$Re > \left\{ \frac{4a^2 \lambda_n}{\lambda_n^2 \frac{2}{B}} B \left[\frac{c T_{пл}}{\gamma \left(1 + \frac{\gamma}{c T_{пл}} \right)} \right] \right\}^{\frac{1}{2-m}}. \quad (3.2.40)$$

Конкретизируя зависимость α от скорости для сверхтонких цилиндров в форме (3.2.31), условие (3.2.39) запишем еще так:

$$\nu^{1,53} > \frac{2,08 a^2 \lambda_n}{\lambda d^{1,53} \nu^{0,47}} \cdot \frac{c T_{пл}}{\gamma \left(1 + \frac{\gamma}{c T_{пл}}\right)}, \quad (3.2.40, a)$$

где индекс «в» указывает на принадлежность к воздуху.

Наличие «температурной ямы» означает, что кристаллизация движущегося стержня идет с переохлаждением. Из соотношения (3.2.40) видно, что предельная скорость, при превышении которой процесс вытягивания идет с переохлаждением, обратно пропорциональна диаметру стержня. Наименьшая температура переохлажденной жидкости определяется выражением

$$\begin{aligned} T_{\min} &= \frac{\rho \nu \gamma}{2 \lambda g} \left(\frac{2 \lambda g T_K}{2 \lambda g T_{пл} - \rho \nu \gamma} \right)^{k/2} \left\{ \frac{\varepsilon}{k} \left[1 - \frac{2 \lambda g T_K}{\rho \nu \gamma} \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. \left(\frac{2 \lambda g T_{пл} - \rho \nu \gamma}{2 \lambda g T_K} \right)^{k/2} \right] \right\}^{k/2g} + \left[T_K - \frac{\rho \nu \gamma}{2 g \lambda} \left(\frac{2 \lambda g T_K}{2 \lambda g T_{пл} - \rho \nu \gamma} \right)^{k/2} \right] \times \\ &\times \left\{ \frac{\varepsilon}{k} \left[1 - \frac{2 \lambda g T_K}{\rho \nu \gamma} \right] \cdot \left[\left(\frac{2 \lambda g T_{пл} - \rho \nu \gamma}{2 \lambda g T_K} \right)^{k/2} \right]^{\varepsilon/2g} \right\} = \\ &= \frac{2 g T_K}{k} \left\{ 1 - \frac{\rho \nu \gamma}{2 \lambda g T_K} \left(\frac{2 \lambda g T_K}{2 \lambda g T_{пл} - \rho \nu \gamma} \right)^{k/2} \right\} \times \\ &\times \left\{ \frac{\varepsilon}{k} \left[1 - \frac{2 \lambda g T_K}{\rho \nu \gamma} \left(\frac{2 \lambda g T_{пл} - \rho \nu \gamma}{2 \lambda g T_K} \right)^{k/2} \right] \right\}^{\varepsilon/2g}. \end{aligned} \quad (3.2.41)$$

Используя предыдущее приближение, т. е. пренебрегая вторым слагаемым в первых скобках и единицей во втором сомножителе, приведем соотношение (3.2.41) к виду

$$T_{\min} \approx \frac{1}{\lambda k} \left(-\frac{\varepsilon}{k} \right)^{\varepsilon/2g} \left[\frac{2 \lambda g T_{пл} - \rho \nu \gamma}{(\rho \nu \gamma)^{\varepsilon/k}} \right]^{k/2g}. \quad (3.2.42)$$

В силу условия (3.2.25) имеем

$$T_{\min} > 0. \quad (3.2.42, a)$$

Как следует из (3.2.42), наименьшая температура переохлаждения, так же как и сама возможность существования переохлажденной жидкости, не зависит от граничной температуры расплава с точностью до малой поправки. Ее влияние в основном сказывается через усредненные по температуре тепловые константы микропровода.

На рис. 40 и 41 показаны зависимости T_{\min} от диаметра жилы и от скорости вытягивания медного микропровода. У всех приведенных кривых ясно наблюдается одна и та же тенденция: с ростом скорости или диаметра они стремятся к некоторому постоянному значению. Этот

результат легко получить аналитически непосредственно из формулы (3.2.42). Действительно, рассмотрим выражение

$$\begin{aligned} & \lim_{v \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\lambda k} \left(-\frac{\varepsilon}{k} \right)^{\varepsilon/2g} \left[\frac{2 \lambda g T_{пл} - \rho v \gamma}{(\rho v \gamma)^{\varepsilon/k}} \right]^{k/2g} \right) = \\ & = \lim_{v \rightarrow \infty} \left(-\frac{k}{\varepsilon} \right)^{-\frac{\varepsilon}{2g}} \lim_{v \rightarrow \infty} (\rho v \gamma)^{-\varepsilon/2g} \times \\ & \times \lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda k} (2 \lambda g T_{пл} - \rho v \gamma)^{k/2g}. \end{aligned} \quad (3.2.43)$$

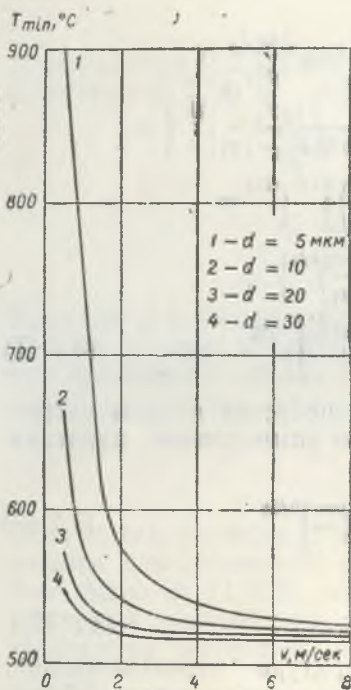


Рис. 40. Зависимость минимальной температуры переохлаждения от диаметра жилы медного микропровода

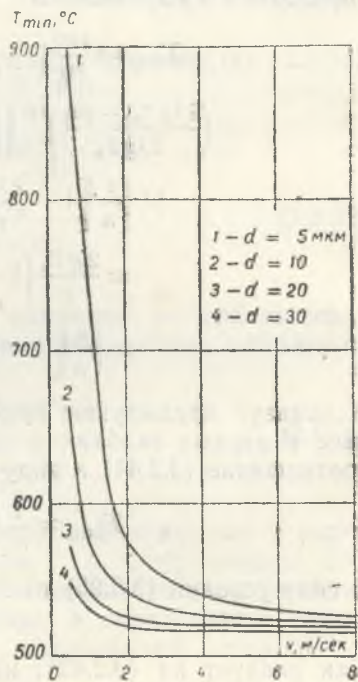


Рис. 41. Зависимость минимальной температуры переохлаждения от скорости вытягивания медного микропровода

Первые два предела представляют собой неопределенности вида ∞^0 . Переходя в этих выражениях к логарифмам и раскрывая вновь получившиеся неопределенности по правилу Лопиталья, получим

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \left[-\frac{\varepsilon}{2g} \ln \left(-\frac{k}{\varepsilon} \right) \right] = 0, \quad \lim_{v \rightarrow \infty} \left[-\frac{\varepsilon}{2g} \ln \rho v \gamma \right] = 0,$$

и следовательно,

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \left(-\frac{k}{\varepsilon} \right)^{-\frac{\varepsilon}{2g}} = \lim_{v \rightarrow \infty} (\rho v \gamma)^{-\frac{\varepsilon}{2g}} = 1.$$

Вычисление последнего предела не имеет никаких особенностей:

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda k} (2\lambda g T_{\text{пл}} - \rho v \gamma)^{k/2g} = \frac{1}{\lambda} (\lambda T_{\text{пл}} - a \rho \gamma). \quad (3.2.44)$$

После небольших преобразований окончательно находим

$$\lim_{v \rightarrow \infty} T_{\text{min}} = T_{\text{min.пр}} = T_{\text{пл}} - \frac{\gamma}{c}, \quad (3.2.45)$$

где $T_{\text{min.пр}}$ — предельно возможная температура переохлажденной жидкости. Аналогичный результат получится, если рассмотреть

$$\lim_{d \rightarrow \infty} T_{\text{min}} = \lim_{d \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{\lambda k} \left(-\frac{\varepsilon}{k} \right)^{\frac{\varepsilon}{2g}} \left[\frac{2\lambda g T_{\text{пл}} - \rho v \gamma}{(\rho v \gamma)^{2/3}} \right]^{\frac{k}{2g}} \right\}.$$

В соответствии с условием (3.2.27) имеем

$$T_{\text{min.пр}} > 0. \quad (3.2.46)$$

Это неравенство означает, что максимально переохлажденная жидкость находится все же при температуре более высокой, нежели температура окружающей среды. Полученный результат и представляет собой, очевидно, основное физическое содержание условия (3.2.27). Ему можно дать такую формулировку: для нормального протекания процесса кристаллизации с термической точки зрения необходимо, чтобы тепловое состояние внешней среды не препятствовало возможности предельного переохлаждения жидкости. Введем величину

$$T_r = T_{\text{пл}} - T_{\text{min.пр}}, \quad (3.2.47)$$

дающую по отношению к истинной температуре кристаллизации предельную температуру, на которую можно переохладить жидкость. Эту величину естественно назвать максимально возможной глубиной переохлаждения. Тогда с учетом (3.2.45), получим

$$T_r = \frac{\gamma}{c}. \quad (3.2.48)$$

Последняя формула говорит о том, что у жидкостей, возможно, имеется предельно допустимая глубина переохлаждения точно так же, как и у реальных газов в соответствии с уравнением состояния.

В связи со сказанным ясен физический смысл безразмерного комплекса $\gamma/c T_{пл}$, входящего в соотношения (3.2.39) и (3.2.40). Этот комплекс, характеризующий скорости, необходимые для перехода жидкости в переохлажденное состояние, представляет собой не что иное, как отношение предельно допустимой глубины переохлаждения к температуре кристаллизации. При этом для его величины существует оценка сверху

$$\frac{\gamma}{c T_{пл}} < 1. \quad (3.2.46, a)$$

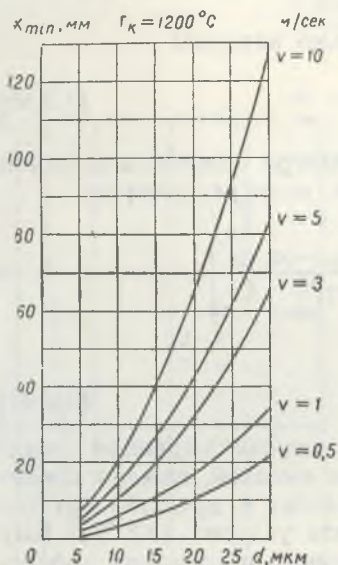


Рис. 42. Влияние диаметра жилы медного стержня на положение температурного минимума

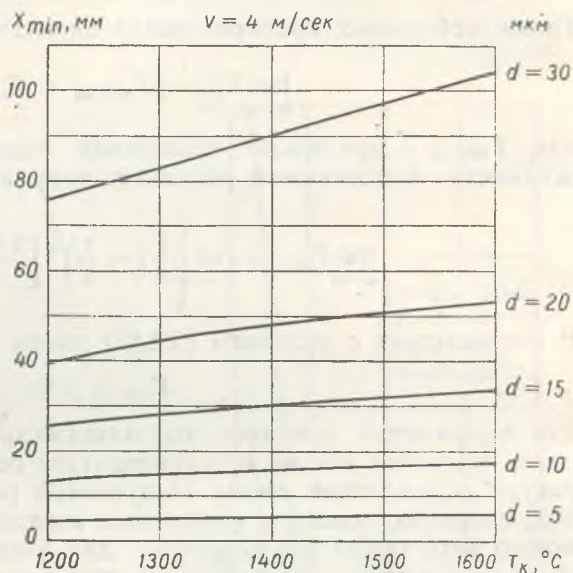


Рис. 43. Влияние исходной температуры расплава на положение температурного минимума

Перейдем теперь к положению температурного минимума на длине стержня. Координата сечения, в котором достигается наибольшее переохлаждение, определяется выражением

$$x_{\min} = \frac{1}{2g} \ln \left\{ \frac{\varepsilon}{k} \left[1 - \frac{2 \lambda g T_k}{\rho v \gamma} \left(\frac{2 \lambda g T_k}{2 \lambda g T_{пл} - \rho v \gamma} \right)^{-k/\varepsilon} \right] \right\}, \quad (3.2.49)$$

которое уже не является функцией только материала стержня и его взаимодействия со средой, но зависит также и от состояния расплава.

На рис. 42—44 представлены соответствующие зависимости x_{\min}

от параметров, определяющих процесс вытягивания медной нити. Из рисунков видно, что ход кривых для x_{\min} почти совпадает с ходом кривых для l . Из соотношений (3.2.29) и (3.2.49) расстояние между фронтом кристаллизации и плоскостью минимальных температур при достаточно больших скоростях вытягивания можно приближенно представить в виде

$$l - x_{\min} \approx \frac{l}{2g} \ln \left(- \frac{k}{\varepsilon} \frac{\rho v \gamma}{2 \lambda g T_k} \right). \quad (3.2.50)$$

Отсюда следует, что рассматриваемое расстояние — быстро убывающая функция скорости. Иными словами, с ростом скорости вытягивания температурный переход из переохлажденного состояния на фронт кристаллизации становится все более резким и происходит во все более короткие промежутки времени.

При литье микропровода в выражении (3.2.40) v и d обычно — переменные величины. Поэтому возможность переохлаждения целесообразно характеризовать их произведением. Величина vd — некоторый коэффициент, характеризующий материал стержня и среду, он имеет размерность коэффициента температуропроводности и в некотором смысле может быть сопоставлен с ним. В то время как a характеризует затухание тепловых возмущений, величина vd служит мерой встречных тепловых потоков. Для меди, кристаллизующейся в воздухе при 0°C , имеем

$$v_{\text{пр}} d = 0,7 \cdot 10^{-2} \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}. \quad (3.2.51)$$

Отметим, что в промышленных условиях процесс литья микропровода идет, как правило, с большим переохлаждением. Это приобретает важное значение в связи с закалкой таких нитей в струе кристаллизатора. Ясно, что наилучшие условия закалки обеспечиваются в том случае, если струя охлаждающей жидкости захватывает сечение x_{\min} .

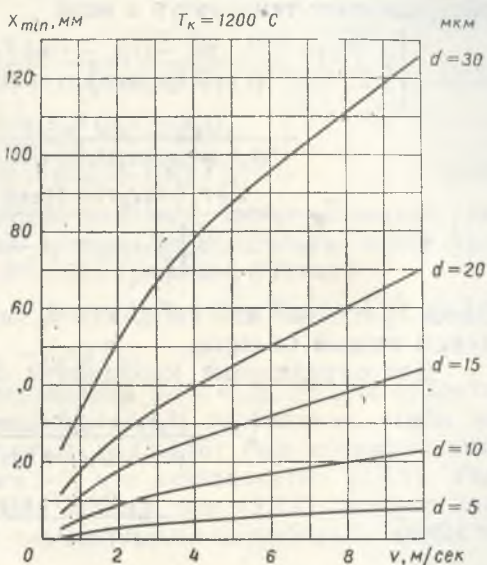


Рис. 44. Влияние скорости вытягивания на положение температурного минимума

§ 3. Кристаллизация микропровода в неоднородной среде

Скачкообразное изменение коэффициентов на границе раздела фаз [22]. Рассмотрим теперь задачу о стационарном температурном поле микропровода в том случае, когда тепловые константы жидкости и твердого тела различны. Эффектами, связанными с изменением объема при затвердевании, по-прежнему пренебрегаем. В этом случае в уравнении (3.2.5) и граничных условиях (3.2.8)—(3.2.10) оставляем в обозначениях теплофизических коэффициентов индексы, соответствующие различным областям интегрирования. Рассматриваемое решение является тривиальным обобщением ранее приведенного.

Повторяя рассуждения предыдущего параграфа, получим искомое распределение температур в виде

$$T_1 = \frac{\rho v \gamma - (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_K \exp(\varepsilon_1 l)}{(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) \exp(k_1 l) - (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) \exp(\varepsilon_1 l)} \exp(k_1 x) +$$

$$+ \frac{(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_K \exp(k_1 l) - \rho v \gamma}{(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) \exp(k_1 l) - (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) \exp(\varepsilon_1 l)} \exp(\varepsilon_1 x), \quad (3.3.1)$$

$$T_2 = \frac{\lambda_1 g T_K [\operatorname{cth}(gl) - 1] \exp(k_1 l) + \rho v \gamma}{\lambda_1 \left[g \operatorname{cth}(gl) + \frac{v}{2 a_1} \right] - \lambda_2 \varepsilon_2} \exp \varepsilon_2 (x - l). \quad (3.3.2)$$

Здесь ε_2 есть не что иное, как ε_1 , внутри которого проставлены индексы второй области.

Для определения координаты фронта кристаллизации получаем

$$1 + \frac{(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{\text{пл}} - \rho v \gamma}{\rho v \gamma - (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{\text{пл}}} \exp(2 gl) -$$

$$- \frac{2 \lambda_1 g T_K \exp(k_1 l)}{\rho v \gamma - (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{\text{пл}}} = 0. \quad (3.3.3)$$

Уравнение (3.3.3) при $v=0$ дает

$$\exp S_1 l = \frac{\lambda_1 S_1 T_K}{(\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2) T_{\text{пл}}} \left[1 \pm \left(1 - \frac{T_{\text{пл}}^2}{T_K^2} \frac{\lambda_1^2 S_1^2 - \lambda_2^2 S_2^2}{\lambda_1^2 S_1^2} \right)^{1/2} \right]. \quad (3.3.4)$$

Ввиду положительности l минус в (3.3.4) необходимо отбросить. Действительно, при $\lambda_1^2 S_1^2 \geq \lambda_2^2 S_2^2$ подкоренное выражение в (3.3.4) не больше единицы, и следовательно, можно написать

$$1 - \frac{T_{\text{пл}}^2}{T_K^2} \frac{\lambda_1^2 S_1^2 - \lambda_2^2 S_2^2}{\lambda_1^2 S_1^2} \leq \left(1 - \frac{T_{\text{пл}}^2}{T_K^2} \frac{\lambda_1^2 S_1^2 - \lambda_2^2 S_2^2}{\lambda_1^2 S_1^2} \right)^{1/2}. \quad (3.3.5)$$

В соответствии с (3.3.5), заменяя подкоренное выражение его нижним значением, получим для второго корня в (3.3.4)

$$\exp(S_1 l) \leq \frac{\lambda_1 S_1 - \lambda_2 S_2}{\lambda_1 S_1} \frac{T_{пл}}{T_k} < 1. \quad (3.3.6)$$

Неравенство (3.3.6) может быть выполнено только для отрицательных значений l , что говорит об отсутствии в этом случае положительных корней уравнения (3.3.4).

Условие $\lambda_1^2 S_1^2 \geq \lambda_2^2 S_2^2$, которое можно интерпретировать как условие раздельного существования двух фаз, приводит к следующему соотношению между тепловыми постоянными:

$$\alpha_1 \lambda_1 \geq \alpha_2 \lambda_2. \quad (3.3.7)$$

Таким образом, при $v=0$

$$l = \frac{1}{S_1} \ln \left[\frac{\lambda_1 S_1 T_k}{(\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2) T_{пл}} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{T_{пл}^2}{T_k^2} \frac{\lambda_1^2 S_1^2 - \lambda_2^2 S_2^2}{\lambda_1^2 S_1^2}} \right) \right]. \quad (3.3.8)$$

Возвращаясь к (3.3.3), можно показать, что условие

$$2\lambda_1 g T_{пл} > \rho v \gamma - (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{пл} \quad (3.3.9)$$

является необходимым и достаточным для того, чтобы указанное уравнение имело один положительный корень. Действительно, корни уравнения (3.3.3) лежат в точках пересечения графиков функций

$$y_1(l) = [(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{пл} - \rho v \gamma] \exp(2gl) - 2\lambda_1 g T_k \exp(k_1 l), \quad (3.3.10)$$

$$y_2(l) = (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{пл} - \rho v \gamma.$$

И так как при всех значениях параметров $y_1(0) < y_2$, то для существования положительного корня уравнения (3.3.3) необходимо, чтобы первый предэкспоненциальный множитель в (3.3.10) был положительным, т. е., чтобы $(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{пл} - \rho v \gamma > 0$, что эквивалентно (3.3.9). Условие (3.3.9) при $v=0$ является более слабым, чем (3.3.7), которое получится при переходе к $v=0$, если дополнительно потребовать, чтобы выполнялось неравенство

$$2\lambda g T_{пл} > (\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{пл} - \rho v \gamma. \quad (3.3.11)$$

Однако это неравенство не является необходимым условием существования положительного корня уравнения (3.3.3) при любых v . Условие (3.3.9) при $v \rightarrow \infty$ не меняет вида формулы (3.2.16). Она только уточняется в том смысле, что значение удельной теплоемкости должно относиться к жидкой фазе. Пренебрегая в (3.3.3) единицей по сравнению с другими слагаемыми, находим

$$l = \frac{1}{g - \frac{v}{2a_1}} \ln \frac{2\lambda g T_k}{(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{пл} - \rho v \gamma}. \quad (3.3.12)$$

Эта формула является приближенной во всей области изменения v . Она дает несколько завышенное значение для l . При $v=0$ ее максимальная погрешность равна $\ln 2/S$. Из (3.3.12) и (3.3.8) видно, что положение изотермической границы фазового перехода не сильно зависит от тепловых свойств твердого тела.

Переходя к определению условий, когда в некоторой точке внутри $(0, l)$ вектор теплового потока обращается в нуль, мы должны по-прежнему сделать заключение о знаках предэкспоненциальных множителей в (3.3.1). Для этого прежде всего заметим, что в силу положительности температуры оба они не могут быть одновременно отрицательными. Кроме того коэффициент при убывающей экспоненте должен быть существенно положительным. В противном случае температура была бы монотонно возрастающей функцией координаты, что противоречит второму началу термодинамики. Требование положительности первого коэффициента приводит к неравенству

$$\rho v \gamma > (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_k \exp(\varepsilon_1 l), \quad (3.3.13)$$

решение которого в замкнутой форме получить не удастся. Однако, считая (3.3.13) выполненным, обратимся к условию (3.2.34), которое с учетом (3.3.3) запишется в виде

$$\left[-\frac{\varepsilon_1}{k_1} \frac{(T_k \exp(k_1 l) - T_{пл})}{[T_{пл} - T_k \exp(\varepsilon_1 l)]} \right]^{-\varepsilon_1} < \left[\frac{2\lambda_{1g} T_k}{(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{пл} - \rho v \gamma} \right]^{2g}. \quad (3.3.14)$$

Так как во всех интересных случаях $T_{пл} \ll T_k \exp(\kappa_1 l)$, то в числителе левой части (3.3.14) $T_{пл}$ можно пренебречь по сравнению с другим членом, что только усилит неравенство. Используя (3.3.12), получаем

$$v > a_2 S_2 \sqrt{\frac{c_2 \rho_2 T_{пл}}{\rho \gamma \left(1 + \frac{\rho \gamma}{c_2 \rho_2 T_{пл}} \right)}}. \quad (3.3.15)$$

Покажем теперь, что условия (3.3.15) достаточно и для выполнения неравенства (3.3.13). Действительно, последнее с учетом (3.3.3) примет вид

$$T_{пл} > T_k \exp(\varepsilon_1 l), \quad (3.3.16)$$

или, используя (3.3.12),

$$\lambda_1 \varepsilon_1 T_{пл} < \lambda_2 \varepsilon_2 T_{пл} + \rho v \gamma. \quad (3.3.17)$$

В (3.3.17) $\lambda_1 \varepsilon_1 T_{пл} < 0$, поэтому, заменив $\lambda_1 \varepsilon_1 T_{пл}$ на нуль, только усилим неравенство. А из

$$\lambda_2 \varepsilon_2 T_{пл} + \rho v \gamma > 0 \quad (3.3.18)$$

следует (3.3.15). Таким образом, условие (3.3.15) является необходимым и достаточным для существования температурного минимума в

(0, l). Из (3.3.15) следует, что возможность эффекта переохлаждения определяется главным образом тепловыми характеристиками затвердевшей области ($v \sim \lambda_2^{1/2}$). Этот результат вполне очевиден и из простых физических соображений. Действительно, вследствие движения стержня тепло, выделяющееся при фазовом переходе, рассеивается в окружающую среду твердым телом, причем между средой и телом устанавливается динамическое равновесие. Однако при определенных скоростях среда уже не в состоянии принять все предлагаемое ей тепло, теплота от фазового перехода пропорциональна v , в то время как теплоотдача в среду пропорциональна \sqrt{v} .

Тогда в силу конечности коэффициента теплопроводности твердая фаза начинает служить своего рода «запирающим слоем». Вследствие этого избыток выделившегося при фазовом переходе тепла поступает обратно в жидкость и разогревает ее вблизи фронта кристаллизации. Грубо говоря, переохлаждение наступает тогда, когда разность между тепловым потоком в твердую фазу вблизи фронта кристаллизации и теплотой фазового перехода становится отрицательной, т. е.

$$-\lambda_2 \left. \frac{dT_2}{dx} \right|_{x=l} - \rho v \gamma = -\lambda_2 \varepsilon_2 T_{пл} - \rho v \gamma < 0, \quad (3.3.19)$$

что совпадает с (3.3.18). Приведем еще соответствующее выражение для наименьшей температуры переохлаждения:

$$T_{\min} \approx \frac{2g_1 T_K}{k_1} \left(-\frac{\varepsilon_1}{k_1} \right)^{2g} (\rho v \gamma)^{-\frac{\varepsilon_1}{2g}} \times \\ \times \left\{ (\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_K \left[\frac{2\lambda_1 g_1 T_K}{(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{пл} - \rho v \gamma} \right]^{-\frac{k_1}{\varepsilon_1}} \right\}^{\varepsilon_1/2g}. \quad (3.3.20)$$

Как следует из (3.3.20), T_{\min} слабо зависит от исходной температуры расплава. Однако предельный переход $v \rightarrow \infty$ в (3.3.20) только уточняет формулу (3.2.37) в смысле того, что удельная теплоемкость принадлежит жидкой фазе.

Кристаллизация в среде жидкости [23]. Пусть теперь кристаллизация стержня происходит при принудительном охлаждении в струе жидкости. В этом случае разобьем стержень на четыре части

$$\left. \begin{array}{l} \text{I} - 0 \leq x \leq l_1, \\ \text{II} - l_1 \leq x \leq l_2, \\ \text{III} - l_2 \leq x \leq l_3, \\ \text{IV} - l_3 \leq x < \infty \end{array} \right\} \quad (3.3.21)$$

При решении задачи удобно перейти к безразмерным величинам. Введем следующую систему безразмерных критериев:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{x}{R}, \quad l_i^0 = \frac{l_i}{R}, \quad P_i = \frac{vR}{2a_1}, \quad Bi_i = \frac{2\alpha_i R}{\lambda_i}, \\ \Lambda_i &= \frac{\lambda_i}{\lambda_4}, \quad Ko = \frac{\gamma}{c_2 T_{пл}}, \quad k_i = \frac{l_3}{l_1}, \quad \Theta_i = \frac{T_i}{T_{пл}}, \\ \Theta_k &= \frac{T_k}{T_{пл}}, \quad i=1, 2, 3, 4. \end{aligned} \quad (3.3.22)$$

Тогда система уравнений примет вид

$$\frac{d^2 \Theta_i}{dz^2} - 2P_i \frac{d\Theta_i}{dz} - Bi_i \Theta_i = 0, \quad (3.3.23)$$

а граничными условиями будут

$$\begin{aligned} \Theta_1|_{z=0} &= \Theta_k, \quad \Theta_i|_{z=l_i} = \Theta_{i+1}|_{z=l_i}, \\ \left[\Lambda_i \frac{d\Theta_i}{dz} - \Lambda_{i+1} \frac{d\Theta_{i+1}}{dz} \right]_{z=l_i} &= 2Ko P_i \Lambda_i \delta_{i,i+1}^{2,3}, \\ \Theta_4|_{z \rightarrow \infty} &\rightarrow 0, \end{aligned} \quad (3.3.24)$$

где $\delta_{ij}^{2,3}$ — обобщенный символ Кронекера,

$$\delta_{ij}^{2,3} = \begin{cases} 1 & \text{при } i=2, j=3, \\ -1 & \text{при } i=3, j=2, \\ 0 & \text{во всех остальных случаях.} \end{cases} \quad (3.3.25)$$

Решение приведенной задачи имеет вид

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= \{ \{ 2\Lambda_2 g_2 \exp 2P_2 l_1^0 + \Theta_k [(\Lambda_2 \varepsilon_2 - \Lambda_1 \varepsilon_1) \times \\ &\times \exp(k_2 l_2^0 + \varepsilon_2 l_1^0) - (\Lambda_2 k_2 - \Lambda_1 k_1) \exp(k_2 l_1^0 + \varepsilon_2 l_2^0)] \times \\ &\times \exp \varepsilon_1 l_1^0 \} \exp k_1 Z + \{ \Theta_k [(\Lambda_2 k_2 - \Lambda_1 k_1) \exp(k_2 l_1^0 + \varepsilon_2 l_2^0) + \\ &+ (\Lambda_1 k_1 - \Lambda_2 k_2) \exp(k_2 l_2^0 + \varepsilon_2 l_1^0)] \exp k_1 l_1 - 2\Lambda_2 g_2 \exp 2P_2 l_1^0 \} \times \\ &\times \exp \varepsilon_1 Z \} \{ [\Lambda_1 k_1 \exp k_1 l_1^0 - \Lambda_1 \varepsilon_1 \exp \varepsilon_1 l_1^0] [\exp(k_2 l_2^0 + \varepsilon_2 l_1^0) - \\ &- \exp(k_2 l_1^0 + \varepsilon_2 l_2^0)] + [\exp \varepsilon_1 l_1^0 - \exp k_1 l_1^0] \times \\ &\times [\Lambda_2 \varepsilon_2 \exp(k_2 l_2^0 + \varepsilon_2 l_1^0) - \Lambda_2 k_2 \exp(k_2 l_1^0 + \varepsilon_2 l_2^0)] \}^{-1}, \end{aligned} \quad (3.3.26)$$

$$\begin{aligned}
\Theta_2 = & \{ [(\Lambda_1 k_1 \exp k_1 l_1^0 - \Lambda_1 \varepsilon_1 \exp \varepsilon_1 l_1^0) - \Lambda_2 \varepsilon_2 \times \\
& \times (\exp k_1 l_1^0 - \exp \varepsilon_1 l_1^0)] \exp \varepsilon_2 l_1^0 - \Theta_\kappa [\Lambda_1 k_1 \exp 2P_1 l_1^0 - \\
& - \Lambda_1 \varepsilon_1 \exp 2P_1 l_1^0] \exp \varepsilon_2 l_2^0 \} \exp k_2 Z + \{ \Theta_\kappa (\Lambda_1 k_1 - \Lambda_1 \varepsilon_1) \times \\
& \times \exp (k_2 l_2^0 + k_1 l_1^0 + \varepsilon_1 l_1^0) + [\Lambda_2 k_2 (\exp k_1 l_1^0 - \exp \varepsilon_1 l_1^0) - \\
& - \Lambda_1 k_1 \exp k_1 l_1^0 + \Lambda_1 \varepsilon_1 \exp \varepsilon_1 l_1^0] \exp k_2 l_1^0 \} \exp \varepsilon_2 Z \} \times \\
& \times \{ [\Lambda_1 k_1 \exp k_1 l_1^0 - \Lambda_1 \varepsilon_1 \exp \varepsilon_1 l_1^0] [\exp (k_2 l_2^0 + \varepsilon_2 l_1^0) - \\
& - \exp (k_2 l_1^0 + \varepsilon_2 l_2^0)] + [\exp \varepsilon_1 l_1^0 - \exp k_1 l_1^0] \times \\
& \times [\Lambda_2 \varepsilon_2 \exp (k_2 l_2^0 + \varepsilon_2 l_1^0) - \Lambda_2 k_2 \exp (k_2 l_1^0 + \varepsilon_2 l_2^0)] \}^{-1},
\end{aligned} \tag{3.3.27}$$

$$\begin{aligned}
\Theta_3 = & \{ (\Lambda_3 \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \exp (\varepsilon_3 - \varepsilon_4) l_3^0 \exp k_3 Z + (\varepsilon_4 - \Lambda_3 k_3) \exp (k_3 l_3^0 + \varepsilon_4 l_3^0) \times \\
& \times \exp \varepsilon_3 Z \} \{ [\Lambda_3 \varepsilon_3 \exp (k_3 l_2^0 + \varepsilon_3 l_3^0) - \Lambda_3 k_3 \exp (k_3 l_3^0 + \varepsilon_3 l_2^0)] \times \\
& \times \exp \varepsilon_4 l_3^0 - \varepsilon_4 [\exp (k_3 l_2^0 + \varepsilon_3 l_3^0) - \\
& - \exp (k_3 l_3^0 + \varepsilon_3 l_2^0)] \exp \varepsilon_4 l_3^0 \}^{-1},
\end{aligned} \tag{3.3.28}$$

$$\begin{aligned}
\Theta_4 = & (\Lambda_3 \varepsilon_3 - \Lambda_3 k_3) \exp (k_3 l_3^0 + \varepsilon_3 l_3^0) \exp \varepsilon_4 Z \times \\
& \times \{ [\Lambda_3 \varepsilon_3 \exp (k_3 l_2^0 + \varepsilon_3 l_3^0) - \Lambda_3 k_3 \exp (k_3 l_3^0 + \varepsilon_3 l_2^0)] \times \\
& \times \exp \varepsilon_4 l_3^0 - \varepsilon_4 \exp [k_3 l_2^0 + \varepsilon_3 l_3^0] - \exp (k_3 l_3^0 + \varepsilon_3 l_2^0) \} \times \\
& \times \exp \varepsilon_4 l_3^0 \}^{-1}.
\end{aligned} \tag{3.3.29}$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
k_i = P_i^2 + g_i = P_i^2 + (P_i^2 + B_i)^{1/2}, \\
\varepsilon_i = P_i^2 - g_i = P_i^2 - (P_i^2 + B_i)^{1/2}.
\end{aligned} \tag{3.3.30}$$

Третье из граничных условий (3.3.24) приводит к уравнению для определения изотермической границы фазового перехода

$$\begin{aligned}
& [(\alpha^0 \psi_1 + \alpha^0 \varphi) \exp (-2g_1 l_1^0) + (W \psi_1 + \psi W_1)] \times \\
& \times \exp [2g_3 l_2^0 + \varepsilon_3 l_3^0 + k_2 l_1^0] + [(\alpha^0 \varphi_1 + \alpha^0 \varphi) \times \\
& \times \exp (-2g_1 l_1^0) + (W \varphi_1 + \varphi W_1)] \exp (k_3 l_3^0 + k_2 l_1^0) + \\
& + [(\psi_1 \beta + \psi \beta_1) \exp (-2g_1 l_1^0) + (\psi_1 \delta + \psi \delta_1)] \times \\
& \times \exp [2(g_2 + g_3) l_2^0 + \varepsilon_3 l_3^0 + \varepsilon_2 l_1^0] + [(\varphi \beta_1 + \varphi_1 \beta) \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \exp(-2g_1 l_1^0) + (\varphi \delta_1 + \varphi_1 \delta) \exp(k_3 l_3^0 + \varepsilon_2 l_1^0 + 2g_2 l_2^0) + \\ & + \psi \delta_2 \exp[(2g_3 + k_2)(l_2^0 + \varepsilon_3 l_3^0 + \varepsilon_1 l_1^0)] + \psi \delta_2 \times \\ & \times \exp(k_2 l_2^0 + k_3 l_3^0 + \varepsilon_1 l_1^0) = A \exp 2g_3 l_2^0 + B \exp 2(g_2 + g_3) l_2^0 + \\ & + C \exp 2g_2 l_2^0 + D \exp(2g_3 + k_2) l_2^0 + E \exp k_2 l_2^0 + F = 0. \quad (3.3.31) \end{aligned}$$

В последнем для упрощения записи введены обозначения

$$\begin{aligned} \gamma^0 &= 2P_2 \text{Ko} \Lambda_2, & \alpha^0 &= \Lambda_1 \varepsilon_1 - \Lambda_2 \varepsilon_2, \\ \varphi &= \Lambda_3 k_3 - \Lambda_4 \varepsilon_4, & \alpha_1^0 &= \Lambda_2 \varepsilon_2 (\Lambda_2 k_2 - \Lambda_1 \varepsilon_1) + \alpha^0 \gamma^0, \\ \varphi_1 &= \Lambda_3 \varepsilon_3 (\Lambda_3 k_3 - \Lambda_4 \varepsilon_4), & \beta &= \Lambda_2 \varepsilon_2 - \Lambda_1 \varepsilon_1, \\ \psi &= \Lambda_4 \varepsilon_4 - \Lambda_3 \varepsilon_3, & \beta_1 &= \Lambda_2 k_2 (\Lambda_1 \varepsilon_1 - \Lambda_2 \varepsilon_2) + \beta \gamma^0, \\ \psi_1 &= \Lambda_3 k_3 (\Lambda_4 \varepsilon_4 - \Lambda_3 \varepsilon_3), & \delta &= \Lambda_1 k_1 - \Lambda_2 \varepsilon_2, \\ W &= \Lambda_2 k_2 - \Lambda_1 k_1, & \delta_1 &= \Lambda_2 k_2 (\Lambda_2 \varepsilon_2 - \Lambda_1 k_1) + \delta \gamma^0, \\ W_1 &= \Lambda_2 \varepsilon_2 (\Lambda_1 k_1 - \Lambda_2 k_2) + W \gamma^0, & \delta_2 &= 4\Theta_K \Lambda_1 \Lambda_2 g_1 g_2. \end{aligned} \quad (3.3.32)$$

Уравнение (3.3.31) было решено на БЭСМ-2М. Вычисление l_2^0 производилось при самых различных сочетаниях безразмерных параметров (3.3.22). При этом учитывалось, что при переходе через фронт кристаллизации кинетические коэффициенты могут скачкообразно меняться как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения, внутри каждой области их изменение также не является однообразным.

Программа поиска координаты фронта кристаллизации была составлена следующим образом. В промежутке 0—15000 с шагом $h=50$ ищется отрезок, на концах которого функция $f(l_2^0)$ принимает разные знаки. Затем методом половинного деления найденный отрезок сужается до точки, представляющей собой корень уравнения (3.3.31). При этом корень вычисляется с точностью до 0,01.

Так как из-за большого числа параметров найти наиболее показательные зависимости l_2^0 от каждого из них не удалось, а основная масса вычисленных корней уравнения (3.3.31) слабо меняется при изменении безразмерных критериев и лежит либо вблизи верхней, либо вблизи нижней границы охлаждающей струи, то ниже рассматриваются только некоторые решения, представляющие физический интерес. При этом для проверки роли условия (3.2.35а) критерий Ko принимается равным 1,5. Результаты численного эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

1. Изотермическая граница фазового перехода не всегда находится внутри границ жидкостной струи. Как правило, при $\text{Bi}_1=10^{-7}$ имеем $l_2^0 > l_3^0$, а при $\text{Bi}_1 \geq 10^{-3}$ вычисления дают $l_2^0 < l_1^0$.

2. При достаточно сильном охлаждении в струе кристаллизатора и в определенных пределах изменения критерия Bi_1 зависимость l_2^0 от параметра P_1 в большом интервале изменения последнего практически несущественна. Так, например, при $Bi_1 = 10^{-1}$

$$P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 1,2 : 1 : 1,7 : 1,4 ; \Lambda_1 = 1,5,$$

$$\Lambda_1 : \Lambda_2 : \Lambda_3 = 2 : 2,1 : 1,2 ; Bi_1 : Bi_2 : Bi_3 : Bi_4 = 5 : 20 : 15 : 2,$$

$l_1^0 = 500$, $k_l = 1,3$, $\theta_k = 1,3$ и $Ko_1 = 1,5$, координата l_2^0 изменяется от 496,24 до 499,98 при изменении P_1 от 10^{-9} до 10^2 .

3. Зависимость $l_2 = f(\theta_k)$ наиболее актуальна в области малых критериев Bi_1 ($Bi_1 \leq 10^{-5}$). В области достаточно больших значений критерия Bi_1 ($Bi_1 \geq 10^{-3}$) эта зависимость весьма слаба. Так, при указанных выше значениях безразмерных параметров и $P_1 = 10^{-5}$ величина l_2^0 с изменением θ_k от 1 до 2 постоянна в пределах точности вы-

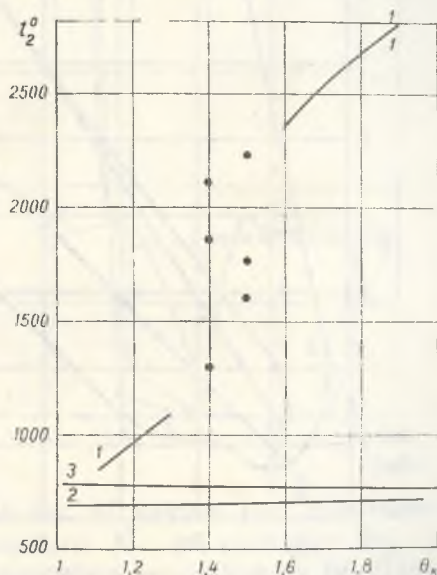


Рис. 45. Зависимость безразмерной координаты фронта кристаллизации от безразмерной температуры расплава

числений. Для некоторых значений безразмерных параметров зависимость $l_2^0 = f(\theta_k)$ графически представлена на рис. 45. Кривые на этом рисунке обозначаются так:

1. $P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 1 : 2,1 : 1,7 : 1,4 ; \Lambda_1 : \Lambda_2 : \Lambda_3 = 2 : 2,1 : 1,2 ;$
 $Bi_1 : Bi_2 : Bi_3 : Bi_4 = 5 : 10 : 15 : 2 ; \Lambda_1 = 1,5 ; l_1^0 = 500 ; k_l = 1,3 ; P_1 = 10^{-5} ;$
 $Bi_1 = 10^{-7}.$

2. $P_1:P_2:P_3:P_4 = 2:1,9:1,4:1,2$; $\Lambda_1:\Lambda_2:\Lambda_3 = 5:7:15$; $Bi_1:$
 $:Bi_2:Bi_3:Bi_4 = 4:15:12:2$; $\Lambda_1=0,6$; $l_1^0 = 500$; $k_l = 1,3$; $P_1 = 10^{-5}$;
 $Bi_1=10^{-3}$.

3. $P_1:P_2:P_3:P_4 = 2:1,9:1,4:1,2$; $\Lambda_1:\Lambda_2:\Lambda_3 = 5:7:17$; $Bi_1:$
 $:Bi_2:Bi_3:Bi_4 = 4:15:12:2$; $\Lambda_1=0,6$; $l_1^0 = 500$; $k_l = 1,3$; $P_1 = 10^{-5}$.

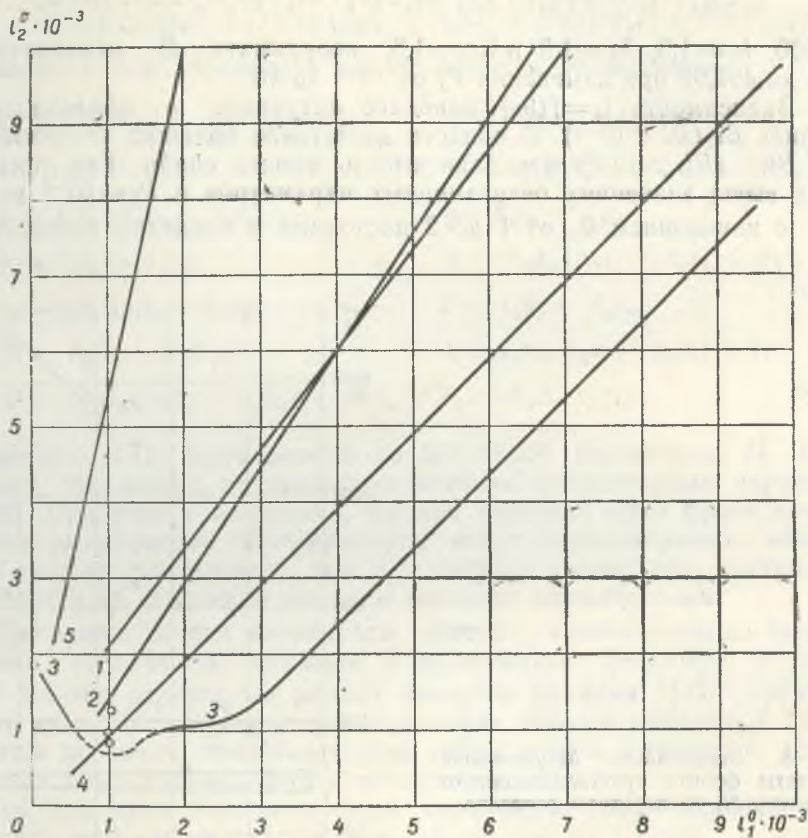


Рис. 46. Зависимость безразмерной координаты фронта кристаллизации от положения охлаждающей струи:

1 - $Bi_1=10^{-7}$; 2 - $Bi_1=10^{-1}$; 3 - $Bi_1=10^{-7}$; 4 - $Bi_1=10^{-1}$; 5 - $Bi_1=10^{-3}$

4. Наиболее сильно выражена зависимость безразмерной координаты фронта кристаллизации от положения охлаждающей струи жидкости. Так, при рассмотренных значениях параметров, изменение l_1^0 от 1 до 9500 влечет за собой возрастание l_2^0 от 1,3 до 9497. При этом для малых значений l_1^0 при неизменном k_l координата l_2^0 опережает l_3^0 ,

а при больших значениях l_1^0 координата l_2^0 отстает от l_1^0 . Для некоторых значений параметров эта зависимость представлена на рис. 46, на котором существует такое соответствие: для кривых 1, 2, 5 — $P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 2 : 1, 9 : 1, 4 : 1, 2$; $\Lambda_1 : \Lambda_2 : \Lambda_3 = 5 : 7 : 15$; $Bi_1 : Bi_2 : Bi_3 : Bi_4 = 4 : 15 : 12 : 2$; $\Lambda_1 = 0,6$; $P_1 = 10^{-5}$; $k_l = 1,3$; $\theta_k = 1,3$; для кривых 3, 4 — $P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 1,2 : 1 : 1,7 : 1,4$; $\Lambda_1 : \Lambda_2 : \Lambda_3 = 2 : 2,1 : 1,2$; $Bi_1 : Bi_2 : Bi_3 : Bi_4 = 5 : 10 : 15 : 2$; $\Lambda_1 = 1,5$; $P_1 = 10^{-5}$; $k_l = 1,3$; $\theta_k = 1,3$.

5. При изменении Bi_1 и аналогичном изменении Bi_3 для $Bi_1 \geq 10$ и аналогично для $Bi_3 \geq 10$ положение фронта кристаллизации не меняет-

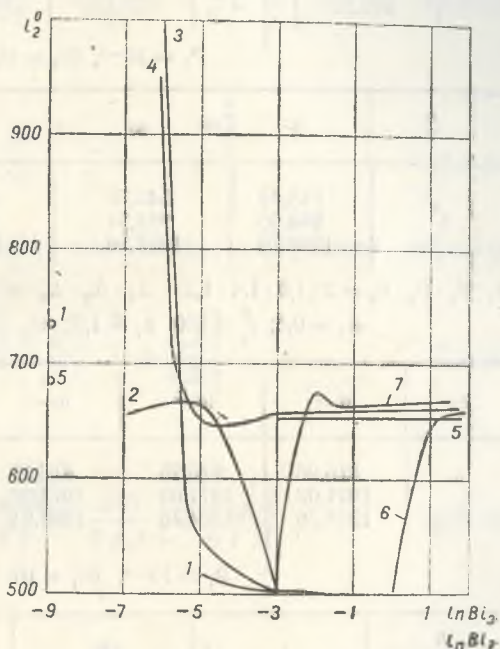


Рис. 47. Влияние интенсивности охлаждения в зоне охлаждающей струи на положение фронта кристаллизации:

1 — $Bi_1 = 10^{-7}$; $Bi_1 : Bi_2 : Bi_4 = 2 : 5 : 1$; 2 — $Bi_1 = 10^{-3}$; $Bi_1 : Bi_2 : Bi_4 = 4 : 15 : 2$; 3 — $Bi_1 = 10^{-3}$; $Bi_1 : Bi_2 : Bi_4 = 2 : 6 : 1$; 4 — $Bi_1 = 10^{-7}$; 4 — $Bi_1 = 10^{-7}$; $Bi_1 : Bi_2 : Bi_4 = 2 : 5 : 1$; 5 — $Bi_1 = 10^{-7}$; $Bi_1 : Bi_2 : Bi_4 = 5 : 15 : 2$; 6 — $Bi_1 = 10^{-7}$; $Bi_1 : Bi_2 : Bi_4 = 5 : 15 : 2$; 7 — $Bi_1 = 10^{-3}$; $Bi_1 : Bi_2 : Bi_4 = 4 : 10 : 2$

ся в пределах точности вычислений. На рис. 47 кривые 1—3 показывают зависимость безразмерной координаты l_2^0 от критерия Bi_2 , а кривые 4—7 дают зависимость этой величины от критерия Bi_3 . При этом кривые 1, 2, 4, 6 имеют параметры: $P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 2 : 1,9 : 1,4 : 1,2$; $\Lambda_1 : \Lambda_2 : \Lambda_3 = 5 : 7 : 15$; $\Lambda_1 = 0,6$; $P_1 = 10^{-5}$; $l_1^0 = 500$; $k_l = 1,3$; $\theta_k = 1,3$; а кривые 3, 5, 7 характеризуются параметрами $P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 1,2 : 1,7 : 1,4 : 1,4$; $\Lambda_1 : \Lambda_2 : \Lambda_3 = 2 : 2,1 : 1,2$; $\Lambda_1 = 1,5$; $P_1 = 10^{-5}$; $l_1^0 = 500$; $k_l = 1,3$; $\theta_k = 1,3$.

6. При малых значениях критерия Bi_1 ($Bi_1 \sim 10^{-7}$) в условиях рассматриваемой задачи, по-видимому, невозможен стационарный режим с одним фронтом кристаллизации (табл. 3). Это соответствует случаю

Некоторые случаи нескольких корней уравнения (3.3.31)

$P_1:P_2:P_3:P_4=1,2:1:1,7:1,4; \Lambda_1:\Lambda_2:\Lambda_3=2:2,1:1,2; B_1:B_2:B_3:B_4=5:10:15:2; \Lambda_1=1,5;$
 $l_1^0 = 500; K_l = 1,3; P_1 = 10^{-5}; K_0 = 1,5; B_1 = 10^{-7}$

θ_k	1,05	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55
l_2^0	309,97	112,6	1251	1372,63	1491,23	1606,55	—
	340,52	—	1885,82	1830,12	1776,4	1724,51	2325
	646,79	—	2010,62	2093,48	2173,44	2250,68	—

$P_1 = 10^{-5}, B_1 = 10^{-7}, l_3^0 = 1310$

l_2^0	1	66	131	586	716
l_2^0	545,78	545,78	545,78	545,8	945,8
	984,95	984,94	984,94	984,94	984,94
	1297,76	1297,76	1297,76	1297,76	1297,76

$P_1:P_2:P_3:P_4=2:1,9:1,4:1,2; \Lambda_1:\Lambda_2:\Lambda_3=5:7:15; B_1:B_2:B_3:B_4=4:15:12:2;$
 $\Lambda_1=0,6; l_1^0 = 500; k_l = 1,3; \theta_k = 1,3; K_0 = 1,5; B_1 = 10^{-7}$

P_1	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
l_2^0	816,26	816,25	816,17	817,6	829,46	—
	1071,02	1071,03	1071,09	1071,67	1077,62	379,3
	1304,76	1304,76	1304,81	1301,03	1267,76	—

$P_1 = 10^{-5}; B_1 = 10^{-7}; l_3^0 = 1301$

l_1^0	1	66	131	196	261
l_2^0	2,03	2,08	2,08	2,09	2,09
	1315,77	1315,77	1315,77	1315,77	1315,77

нескольких корней уравнения (3.3.31). Отметим, что рассматриваемое явление существенно связано с нарушением условия (3.2.46a).

Запишем теперь положительный корень уравнения (3.3.31) в аналитическом виде. При этом возможны различные частные случаи. При $F > 0$ первое приближение находим в виде

$$l_2^0 = \frac{1}{2g_2} \ln \left(-\frac{F}{C} \right), \quad (3.3.33)$$

а при $F < 0$

$$l_2^0 = \frac{1}{k_2} \ln \left(-\frac{F}{E} \right). \quad (3.3.34)$$

Эти формулы дают первую оценку корней уравнения (1.3.31). Для малых корней ($l_2^0 < 600$) уточнение производится по формулам: при $F > 0$:

$$l_2^0 = \frac{1}{k_2} \ln \left[\left(-\frac{F}{C} \right)^{\frac{k_2}{2g_2}} + \frac{k_2 E}{2g_2 F} \left(-\frac{C}{F} \right)^{\frac{k_2}{g_2}} \right], \quad (3.3.35)$$

при $F < 0$:

$$l_2^0 = \frac{1}{k_2} \ln \left[-\frac{F}{E} - \frac{C}{E} \left(-\frac{F}{E} \right)^{\frac{2g_2}{k_2}} \right]. \quad (3.3.36)$$

Большие корни уравнения (3.3.31) находятся следующим образом: при $g_3 > g_2$ и $\text{sign } B \neq \text{sign } D$

$$l_2^0 = \frac{1}{k_2} \ln \left[\left(-\frac{D}{B} \right)^{-\frac{k_2}{g_2}} + \frac{k_2 A}{\varepsilon_2 B} \right], \quad (3.3.37)$$

при $g_3 > g_2$ и $\text{sign } B = \text{sign } D$

$$l_2^0 = \frac{1}{k_2} \ln \left[\left(-\frac{A}{B} \right)^{\frac{k_2}{2g_2}} + \frac{k_2^2 D}{2g_2 A} \left(-\frac{A}{B} \right)^{\frac{k_2}{g_2}} \right], \quad (3.3.38)$$

при $g_3 < g_2$ и $\text{sign } B \neq \text{sign } D$

$$l_2^0 = \frac{1}{k_2} \ln \left[\left(-\frac{D}{B} \right)^{-\frac{k_2}{g_2}} + \frac{k_2 C}{\varepsilon_2 B} \right], \quad (3.3.39)$$

при $g_3 < g_2$ и $\text{sign } B = \text{sign } D$

$$l_2^0 = \frac{1}{k_2} \ln \left[\left(-\frac{C}{B} \right)^{\frac{k_2}{2g_2}} + \frac{k_2 D}{2g_2 C} \left(-\frac{C}{B} \right)^{\frac{k_2}{g_2}} \right]. \quad (3.3.40)$$

В табл. 4 приведены результаты сравнения корней уравнения (3.3.31), полученных на БЭСМ-2М и вычисленных по аналитическим формулам. Согласование результатов удовлетворительное.

Сравнение корней уравнения (3.4.31), вычисленных на ЭВМ БЭСМ-2М и аналитически

Совокупность параметров	Нулевое приближение при счете по максимальным коэффициентам	Первое приближение при счете по максимальным коэффициентам	Нулевое приближение при счете по максимальным коэффициентам	Первое приближение при счете по максимальным показателям	Значение координаты фронта кристаллизации с учетом величины корня (1-е приближение)	Результат, полученный на ЭВМ БЭСМ-2М
$P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 2 : 1,9 : 1,4 : 1,2; \Lambda_1 : \Lambda_2 : \Lambda_3 = 5 : 7 : 15; Bi_1 : Bi_2 : Bi_3 : Bi_4 = 4 : 15 : 12 : 2; \Lambda_1 = 0,6;$ $l_1^0 = 500; k_l = 1,3; \theta_k = 1,3; Ko = 1,5; Bi_1 = 10^{-3}; P_1 = 10^{-9}$	608	1096	676	675	675	664,8
$P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 2 : 1,9 : 1,4 : 1,2; \Lambda_1 : \Lambda_2 : \Lambda_3 = 5 : 7 : 15; Bi_1 : Bi_2 : Bi_3 : Bi_4 = 4 : 15 : 12 : 2; \Lambda_1 = 0,6;$ $l_1^0 = 500; k_l = 1,3; \theta_k = 1,3; Ko = 1,5; Bi_1 = 10^{-1}; P_1 = 10^{-9}$	740	1234	651	651	651	651
$P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 2 : 1,9 : 1,4 : 1,2; \Lambda_1 : \Lambda_2 : \Lambda_3 = 5 : 7 : 15; Bi_1 : Bi_2 : Bi_3 : Bi_4 = 4 : 15 : 12 : 2; \Lambda_1 = 0,6;$ $l_1^0 = 500; k_l = 1,3; \theta_k = 1,3; Ko = 1,5; Bi_1 = 10^{-1}; P_1 = 10^{-2}$	724	1177	644	644	644	650
$P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 1,1 : 1 : 1,5 : 1,3; \Lambda_1 : \Lambda_2 : \Lambda_3 = 2 : 2,1 : 1,2; Bi_1 : Bi_2 : Bi_3 : Bi_4 = 5 : 10 : 15 : 2; \Lambda_1 = 1,5;$ $l_1^0 = 500; k_l = 1,3; \theta_k = 1,3; Ko = 1,5; Bi_1 = 10^{-1}; P_1 = 10^{-3}$	496	496	152	851	496,6	496,5
$P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 1,1 : 1 : 1,5 : 1,3; \Lambda_1 : \Lambda_2 : \Lambda_3 = 2 : 2,1 : 1,2; Bi_1 : Bi_2 : Bi_3 : Bi_4 = 5 : 10 : 15 : 2; \Lambda_1 = 1,5;$ $l_1^0 = 500; k_l = 1,3; Ko = 1,5; \theta_k = 1,3; Bi_1 = 10^{-1}; P_1 = 10^{-2}$	496,6	496,6	157	854	496,6	496,5
$P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 1,2 : 1 : 1,7 : 1,4; \Lambda_1 : \Lambda_2 : \Lambda_3 = 2 : 2,1 : 1,2; Bi_1 : Bi_2 : Bi_3 : Bi_4 = 5 : 10 : 15 : 2; \Lambda_1 = 1,5; l_1^0 = 500; k_l = 1,3; P_1 = 10^{-3}; Ko = 1,5;$ $Bi_1 = 10^{-5}; \theta_k = 1,1$	143,0	257,0	553	644	257,0	266,6
$P_1 : P_2 : P_3 : P_4 = 1,2 : 1 : 1,7 : 1,4; \Lambda_1 : \Lambda_2 : \Lambda_3 = 2 : 2,1 : 1,2; Bi_1 : Bi_2 : Bi_3 : Bi_4 = 5 : 10 : 15 : 2; \Lambda_1 = 1,5; l_1^0 = 500; k_l = 1,3; P_1 = 10^{-5}; Ko = 1,5;$ $Bi_1 = 10^{-5}; \theta_k = 1,95$	284,0	320,0	693	727	320,0	324,0

§ 4. Кристаллизация в условиях переменной внешней температуры

Температура — линейная функция координаты. Из предыдущего параграфа видно, что существенную роль в процессе кристаллизации микропровода играет тепловое состояние внешней среды. Поэтому обобщение рассматриваемой задачи на случай переменной температуры среды представляет известный интерес не только с точки зрения разработки физических основ технологии микролитья в капилляр, но также и в общетехническом смысле.

В условиях переменной температуры среды ($T_c = f(x)$) уравнение (3.2.5) должно быть переформулировано: принимая за нуль температурную температуру среды на бесконечности, напишем в правой части уравнения (3.2.5) член типа источника. Исходные уравнения примут вид

$$\frac{d^2 T_i}{dx^2} - \frac{v}{a_i} \cdot \frac{dT_i}{dx} - S_i^2 T_i = -S_i^2 f(x), \quad i=1,2. \quad (3.4.1)$$

В работе [24] рассматривался случай, когда температура среды менялась по линейному закону вдоль жидкой фазы и оставалась постоянной по длине твердого стержня, т. е.

$$f(x) = \begin{cases} T_0(1 - \beta x) & \text{при } 0 \leq x \leq l, \\ 0 & \text{при } x > l, \end{cases} \quad (3.4.2)$$

где β — некоторый положительный коэффициент, на который накладывается ограничение

$$\beta l \leq 1. \quad (3.4.3)$$

В [24] показано, что включение переменного температурного поля среды вдоль жидкой фазы приводит к росту l , там же найдено, что в неподвижном стержне переохладение жидкой фазы отсутствует. С физической точки зрения отсутствие переохлажденной жидкости в неподвижном стержне является тривиальным следствием второго начала термодинамики. Однако этот факт наглядно показывает, что эффект переохладения существенно связан как с движением стержня, так и с его кристаллизацией. Это означает, что вопреки довольно распространенному мнению переохладение есть не только предварительное условие процесса кристаллизации, но, скорее всего, является следствием самого этого процесса. Такая трактовка отнюдь не исключает влияния переохладения на кристаллизацию и даже не умаляет его роли в качестве регулятора скорости кристаллизации. Ясно, что пренебрежение переносом тепла вследствие массопереноса является не только количественным, но и качественным приближением, так как связано с пренебрежением некоторыми физическими эффектами.

Для задачи (3.4.1) предельная скорость, определяющая начало переохлаждения в жидкой фазе, совпадает с соответствующей скоростью однородной задачи [24]. Последнее имеет довольно простое объяснение: эффект переохлаждения связан с величиной термического сопротивления твердой фазы, которая в условиях рассматриваемой задачи не меняется.

В [24] исследованы границы применимости рассмотренной модели, а в [25] задача решается для экспоненциального падения температуры в среде. Этот случай не имеет никаких особенностей, и результаты [25] легко могут быть получены читателем.

Резонансная кристаллизация [26]. Особый интерес представляет случай, когда темп падения температуры в среде (показатель $-\beta$ в формуле $T_c = T_0 e^{-\beta x}$) совпадает с одним из темпов изменения составляющих температурного поля в микропроводе, т. е. $-\beta$ является одним из корней характеристического уравнения. При этом следует различать, по крайней мере, два случая: 1) $\beta = -\varepsilon_1$; 2) $\beta = -\varepsilon_2$. В первом будет наблюдаться так называемый температурный резонанс в жидкой части, во втором — в твердой части стержня. Рассмотрим каждый из указанных случаев.

1. В первом случае температурное поле имеет вид

$$T_1 = \frac{T_{пл} - D l \exp \varepsilon_1 l - T_k \exp \varepsilon_1 l}{\exp k_1 l - \exp \varepsilon_1 l} \exp k_1 x + \\ + \frac{T_k \exp k_1 l - T_{пл} + D l \exp \varepsilon_1 l}{\exp k_1 l - \exp \varepsilon_1 l} \exp \varepsilon_1 x + D x \exp \varepsilon_1 x, \quad (3.4.4)$$

$$T_2 = (T_{пл} - E \exp \varepsilon_1 l) \exp \varepsilon_2 (x - l) + E \exp \varepsilon_1 x, \quad (3.4.5)$$

где

$$D = \frac{S_1^2 T_0}{2g_1}; \quad E = \frac{S_2^2 T_0}{S_2^2 - \frac{v}{a_2} \varepsilon_1 - \varepsilon_1^2}. \quad (3.4.6)$$

Для определения координаты фронта фазового перехода получаем уравнение

$$[(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{пл} - \rho v \gamma] \exp (2g_1 - \varepsilon_1) l + \\ + [\lambda_1 D - 2\lambda_1 g_1 T_k - \lambda_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E] \exp 2g_1 l + [\rho v \gamma - \\ - (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{пл}] \exp (-\varepsilon_1 l) - 2\lambda_1 g_1 D l \exp 2g_1 l + \\ + \lambda_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E - \lambda_1 D = 0, \quad (3.4.7)$$

решение которого ищем в виде ряда

$$l = l_0 - l_1 \frac{D}{(2g_1 + k_1) T_k} + \dots \quad (3.4.8)$$

Подставляя (3.4.8) в (3.4.7) считаем все $\alpha_i l_1 \ll 1$, где α_i — соответствующие коэффициенты при l_1 в показателях экспонент, раскладывая которые в ряд $\exp \alpha_i l_1 \sim 1 + \alpha_i l_1$ для определения l_0 и l_1 , получаем два уравнения

$$\begin{aligned} & [(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{\text{пл}} - \rho v \gamma] \exp k_1 l_0 - [2 \lambda_1 g_1 T_{\text{к}} + \\ & + \lambda_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E] \exp (k_1 + \varepsilon_1) l_0 + [\rho v \gamma - (\lambda_1 \varepsilon_1 - \\ & - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{\text{пл}}] \exp \varepsilon_1 l_0 + \lambda_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E \exp 2 \varepsilon_1 l_0 = 0, \end{aligned} \quad (3.4.9)$$

$$\begin{aligned} & \lambda_1 (2g + k_1) T_{\text{к}} \exp (k_1 + \varepsilon_1) l_0 - \lambda_1 (2g_1 + k_1) T_{\text{к}} \exp 2 \varepsilon_1 l_0 - \\ & - 2 \lambda_1 g_1 (2g_1 + k_1) T_{\text{к}} l_0 \exp (k_1 + \varepsilon_1) l_0 + [(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{\text{пл}} - \\ & - \rho v \gamma] k_1 l_1 \exp k_1 l_0 - [2 \lambda_1 g_1 T_{\text{к}} + \lambda_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E (k_1 + \\ & + \varepsilon_1) l_1 \exp (k_1 + \varepsilon_1) l_0 + \lambda_1 (k_1 + \varepsilon_1) l_1 \exp (k_1 + \varepsilon_1) l_0] + \\ & + [\rho v \gamma - (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{\text{пл}}] \varepsilon_1 l_1 \exp \varepsilon_1 l_0 + 2 \lambda_2 \varepsilon_1 (\varepsilon_1 - \\ & - \varepsilon_2) E l_1 \exp 2 \varepsilon_1 l_0 = 0. \end{aligned} \quad (3.4.10)$$

Из (3.4.10) находим l_1 как функцию l_0 :

$$\begin{aligned} l_1 = & \lambda_1 (2g_1 + k_1) T_{\text{к}} [2g_1 l_0 \exp (k_1 + \varepsilon_1) l_0 + \\ & + \exp 2 \varepsilon_1 l_0 - \exp (k_1 + \varepsilon_1) l_0] \{[\rho v \gamma - (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{\text{пл}}] \times \\ & \times \varepsilon_1 \exp \varepsilon_1 l_0 + 2 \lambda_2 \varepsilon_1 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E \exp 2 \varepsilon_1 l_0 + \lambda_1 (k_1 + \varepsilon_1) \times \\ & \times \exp (k_1 + \varepsilon_1) l_0 - [2 \lambda_1 g_1 T_{\text{к}} + \lambda_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E] \times \\ & \times (k_1 + \varepsilon_1) \exp (k_1 + \varepsilon_1) l_0 + [(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{\text{пл}} - \\ & - \rho v \gamma] k_1 \exp k_1 l_0\}^{-1}. \end{aligned} \quad (3.4.11)$$

Из (3.4.9) находим l_0 в виде ряда последовательных приближений. В первом приближении

$$l_0' = \frac{1}{g_1 - \frac{v}{2a_1}} \ln y_0 = \frac{1}{g_1 - \frac{v}{2a_1}} \ln \frac{2 \lambda_1 g_1 T_{\text{к}} + \lambda_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E}{(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{\text{пл}} - \rho v \gamma}. \quad (3.4.12)$$

Второе приближение дает

$$\begin{aligned} l_0'' = & \ln \left\{ \exp l_0' + \left\{ \frac{2g_1}{\varepsilon_1} [(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{\text{пл}} - \rho v \gamma] \times \right. \right. \\ & \times \exp (2g_1 + \varepsilon_1) l_0' - \frac{2g_1 + \varepsilon_1}{\varepsilon_1} [2 \lambda_1 g_1 T_{\text{к}} + \lambda_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E] \times \\ & \left. \left. \times \exp 2 (g_1 + \varepsilon_1) l_0' \right\}^{-\varepsilon_1} [\rho v \gamma - (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{\text{пл}}]^{-\varepsilon_1} \right\}. \end{aligned} \quad (3.4.13)$$

Наконец в третьем приближении находим

$$l_0'' = \ln \left\{ \exp l_0'' - \left\{ \frac{\varepsilon_1 - 2g_1}{\varepsilon_1} [(\lambda_1 k_1 - \varepsilon_2 \lambda_2) T_{\text{пл}} - \rho v \gamma] \times \right. \right. \\ \times \exp 2g_1 l_0'' + \frac{2g_1}{\varepsilon_1} [2\lambda_1 g_1 T_k + \lambda_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E] \exp (2g_1 + \varepsilon_1) l_0'' + \\ \left. \left. + [\rho v \gamma - (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{\text{пл}}] \right\}^{\varepsilon_1} [\lambda_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E]^{-\varepsilon_1} \right\}. \quad (3.4.14)$$

Легко видеть, что значение координаты фронта фазового перехода, получаемое из уравнения (3.4.7), является максимально возможным при отсутствии нагрева стержня средой. Действительно, в этом случае члены, зависящие от внешней температуры, вносят максимальный отрицательный вклад в уравнение, из которого определяется изотермическая граница раздела фаз. Физически это объясняется так. В условиях резонанса тепловой поток в среду является минимальным и изменение температуры стержня, обусловленное в основном рассеиванием тепла с его поверхности, будет в соответствии с этим также минимальными. А это означает, что условия, делающие возможным фазовый переход, достигаются позже и кристаллизация будет происходить дальше от верхней границы расплавленного стержня.

Вследствие того что резонанс температур в жидкой области стержня не влияет существенным образом на теплообмен твердой части, условие существования переохлажденной жидкости в этом случае является тривиальным видоизменением соответствующего условия из [24]. Оно может быть представлено в виде

$$\rho v \gamma + \lambda_2 \varepsilon_2 T_{\text{пл}} + \lambda_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) E \exp \varepsilon_1 l > 0 \quad (3.4.15)$$

и ему можно придать форму

$$(\varepsilon_1 - k_2)(\rho v \gamma + \lambda_2 \varepsilon_2 T_{\text{пл}}) - \lambda_2 S_2^2 T_0 \exp \varepsilon_1 l < 0. \quad (3.4.16)$$

Очевидно, что здесь как и в случае [25] предельная скорость, при которой наступает переохлаждение, значительно меньше соответствующей скорости в условиях однородной задачи. Так как $\beta > -\varepsilon_1$, то при $\rho v \gamma + \varepsilon_2 \lambda_2 T_{\text{пл}} < 0$ имеем

$$(-\beta - k_2)(\rho v \gamma + \lambda_2 \varepsilon_2 T_{\text{пл}}) > (\varepsilon_1 - k_2)(\rho v \gamma + \lambda_2 \varepsilon_2 T_{\text{пл}}). \quad (3.4.17)$$

Последнее неравенство означает, что в условиях резонанса переохлаждение наблюдается при меньших скоростях, чем обычно. Это объясняется усилением роли направленного отвода тепла через фронт кристаллизации.

2. Рассмотрим температурный резонанс в твердой части стержня. В этом случае температурное поле будет

$$T_1 = \frac{T_{пл} + F \exp \varepsilon_1 l - (T_k - F) \exp \varepsilon_1 l}{\exp k_1 l - \exp \varepsilon_1 l} \exp k_1 x + \\ + \frac{(T_k - F) \exp k_1 l - T_{пл} + F \exp \varepsilon_2 l}{\exp k_1 l - \exp \varepsilon_1 l} \exp \varepsilon_1 x + F \exp \varepsilon_2 x, \quad (3.4.18)$$

$$T_2 = (T_{пл} - Gl \exp \varepsilon_2 l) \exp \varepsilon_2 (x - l) + Gx \exp \varepsilon_2 x, \quad (3.4.19)$$

где

$$F = \frac{S_1^2 T_0}{S_1^2 + \frac{v}{a_1} \varepsilon_2 - \varepsilon_2^2}, \quad G = \frac{S_2^2 T_0}{2g_2}. \quad (3.4.7, a)$$

Положение фронта кристаллизации определяется теперь из уравнения

$$[(\lambda_1 k_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{пл} - \rho v \gamma] \exp k_1 l + [\rho v \gamma - (\lambda_1 \varepsilon_1 - \lambda_2 \varepsilon_2) T_{пл}] \times \\ \times \exp \varepsilon_1 l + 2 \lambda_1 g_1 (F - T_k) \exp (k_1 + \varepsilon_1) l - [\lambda_1 (k_1 - \varepsilon_2) F + \\ + \lambda_2 G] \exp (k_1 + \varepsilon_2) l + [\lambda_1 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) F + \lambda_2 G] \times \\ \times \exp (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) l = 0, \quad (3.4.20)$$

которое не имеет никаких особенностей в сравнении с ранее рассмотренными трансцендентными уравнениями, что относится и к его решению.

Аналогично предыдущему скорость переохлаждения определяется из неравенства

$$\rho v \gamma + \lambda_2 \varepsilon_2 T_{пл} + \lambda_2 G \exp \varepsilon_2 l, \quad (3.4.21)$$

и так как $\lambda_2 G \exp \varepsilon_2 l > \lambda_2 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) E \exp \varepsilon_1 l > 0$, то скорость переохлаждения, которая находится из (3.4.21), является минимальной.

И, наконец, в случае равных термических постоянных резонанс наступает одновременно и в жидкой и в твердой фазах. При этом температурное поле задается аналогом формул (3.4.4) и (3.4.19), а уравнение для отыскания фронта кристаллизации имеет вид

$$[2 \lambda g T_{пл} - \rho v \gamma] \exp 2 gl - 2 \lambda g T_k \exp kl + \\ + \rho v \gamma - 2 \lambda g D l \exp kl = 0. \quad (3.4.22)$$

Решение этого уравнения ищем также в виде ряда (3.4.8), для определения первых двух коэффициентов которого получаем соотношения

$$(2 \lambda g T_{пл} - \rho v \gamma) \exp 2 gl_0 - 2 \lambda g T_k \exp kl_0 + \rho v \gamma = 0, \quad (3.4.23)$$

и

$$2 gl_1 (2 \lambda g T_{пл} - \rho v \gamma) \exp 2 gl_0 - 2 kl_1 \lambda g T_k \times \\ \times \exp kl_0 - 2 \lambda g (2g + k) T_k l_0 \exp kl_0 = 0. \quad (3.4.24)$$

При этом l_0 задается формулой (3.3.30), а l_1 из (3.4.24)

$$l_1 = \frac{2\lambda g(2g+k)T_k l_0 \exp kl_0}{2g(2\lambda g T_{пл} - \rho v \gamma) \exp 2gl_0 - 2\lambda g k T_k \exp kl_0} = -\frac{2g+k}{\epsilon} l_0. \quad (3.4.25)$$

Таким образом, поправка к первому приближению

$$l_1 \frac{D}{(2g+k)T_k} = -\frac{S_2^2 T_0}{2g\epsilon T_k} l_0.$$

Ясно, что теперь предельная скорость, при которой жидкость переходит в переохлажденное состояние, как и положение фронта фазового перехода, будет экстремальной.

Естественно, рассмотренный процесс резонансного охлаждения имеет определенную аналогию с механическим резонансом, так как в обоих случаях решающее значение приобретает характер энергетического взаимодействия со средой. Однако этим общим фактом сходство и исчерпывается. В температурном резонансе совпадение темпов изменения температуры в теле и в среде создает как бы дополнительную тепловую изоляцию, что находит отражение в резком изменении характеристик кристаллизации, таких как положение фронта фазового перехода и предельная скорость движения, при которой наступает переохлаждение.

§ 5. Кристаллизация при переменном сечении жидкой фазы микропровода

Основные уравнения. Пусть теперь сечение микропровода в жидкой фазе будет переменным. Предположим, что $\frac{d\vec{v}}{dr} = 0$. В этом случае движение жидкости можно считать безградиентным и уравнение теплового баланса для элемента длины жидкой фазы dx имеет вид

$$\lambda_1 \frac{d}{dx} \left(F_1 \frac{dT_1}{dx} \right) dx = c_1 \frac{d}{dx} (\rho_1 v F_1 T_1) dx + \alpha_1 U_1 T_1 dx,$$

где F_1 и U_1 могут быть записаны так:

$$U_1 = 2\pi R_0 f(x), \quad F_1 = \pi R_0^2 f^2(x).$$

Здесь R_0 — радиус микропровода в основании расплавленной массы, а в $f(x)$ включена зависимость радиуса от координаты. В силу теоремы неразрывности струи $\int_F \rho_1 v_i v_i d\vec{F} = 0$, где v_i — внешняя нормаль.

В соответствии с этим для произведения $\rho_1 v F_1$ можно взять его зна-

чение на фронте кристаллизации и вынести его за знак производной. Вводя обозначения

$$\kappa = \frac{v}{a_1} \cdot \frac{R^2}{R_0^2}, \quad S_1^2 = \frac{2\alpha}{\lambda R_0},$$

где R — радиус микропровода на фронте кристаллизации. С учетом сказанного получим окончательное уравнение для распределения температуры в жидкой фазе

$$\frac{d}{dx} \left(f^2 \frac{dT_1}{dx} \right) - \kappa \frac{dT_1}{dx} - S_1^2 f T_1 = 0. \quad (3.5.1)$$

Предполагая, что после кристаллизации геометрия стержня не меняется, получим, что распределение температуры в затвердевшей области находится из уравнения (3.1.3). Граничными условиями будут (3.2.7) — (3.2.10).

Прежде чем перейти к решению поставленной задачи, сделаем в уравнении (3.5.1) замену переменного

$$z = \int \frac{dx}{f^2}.$$

Тогда получим

$$\frac{d^2 T_1}{dz^2} - \kappa \frac{dT_1}{dz} - S_1^2 f^3 T_1 = 0, \quad (3.5.1, a)$$

где f еще должно быть выражено через z , а начало отсчета координаты z выбрано таким образом, чтобы постоянная интегрирования равнялась нулю. Перейдем теперь к рассмотрению конкретных случаев зависимости $f(x)$.

Случай $f = (1 - \delta x)^{1/2}$.

Пусть

$$f(x) = (1 - \delta x)^{1/2}. \quad (3.5.2)$$

Тогда $z = -\frac{1}{\delta} \ln(1 - \delta x)$ и уравнение (3.5.1, a) переписется в виде

$$\frac{d^2 T_1}{dz^2} - \kappa \frac{dT_1}{dz} - S_1^2 e^{-\frac{3}{2} \delta z} T_1 = 0. \quad (3.5.3)$$

Для решения (3.5.3) воспользуемся приемом, неоднократно применявшимся Б. Г. Корневым [28]. Сравним уравнение (3.5.3) с уравнением Бесселя в форме Ломмеля [29]:

$$\frac{d^2 y}{dz^2} - \left[\frac{\psi''(z)}{\psi'(z)} + (2\mu - 1) \frac{\psi'(z)}{\psi(z)} \right] \frac{dy}{dz} + [\mu^2 - \nu^2 + \psi^2(z)] \left[\frac{\psi'(z)}{\psi(z)} \right]^2 y = 0, \quad (3.5.4)$$

решение которого имеет вид

$$y = [\psi(z)]^\nu Z_\nu [\psi(z)], \quad (3.5.5)$$

где Z_ν — цилиндрическая функция индекса ν . Положим $\psi(z) = Ae^{mz}$. Тогда из (3.5.4) получаем

$$\frac{d^2y}{dz^2} - 2\mu m \frac{dy}{dz} + [\mu^2 - \nu^2 + A^2 e^{2mz}] m^2 y = 0.$$

Отсюда находим

$$m^2 = \nu^2, \quad m = -\frac{3}{4}\delta, \quad \mu = -\frac{2}{3}\frac{x}{\delta}, \quad A = iA_1, \quad A_1 = -\frac{4S_1}{3\delta}, \quad y = T_1.$$

Следовательно, частный интеграл уравнения (3.5.3) будет

$$T_1^* = (A_1 e^{mz})^\nu Z_\nu [iA_1 e^{mz}].$$

Обозначив $A_1^\nu = B$ и возвращаясь к старой переменной, получим

$$T_1 = B(1 - \delta x)^{-\frac{1}{2}\frac{x}{\delta}} \left\{ CI_{-\frac{2}{3}\frac{x}{\delta}} [A_1(1 - \delta x)^{3/4}] + \right. \\ \left. + DI_{\frac{2}{3}\frac{x}{\delta}} [A_1(1 - \delta x)^{3/4}] \right\}, \quad (3.5.6)$$

если же $\frac{2}{3}\frac{x}{\delta}$ — целое число, то

$$T_1 = B(1 - \delta x)^{-\frac{x}{2\delta}} \left\{ CI_{\frac{2}{3}\frac{x}{\delta}} \left[A_1(1 - \delta x)^{3/4} + \right] DK_{\frac{2}{3}\frac{x}{\delta}} \cdot A_1(1 - \delta x)^{3/4} \right\}, \quad (3.5.7)$$

где I_n — функция Бесселя мнимого аргумента, а K — функция Макдональда. Определив из граничных условий постоянные C и D для распределения температуры в жидкой фазе, найдем

$$T_1 = \frac{(1 - \delta x)^{-x/2\delta}}{I_{-\frac{2}{3}\frac{x}{\delta}}(A_1) I_{\frac{2}{3}\frac{x}{\delta}} [A_1(1 - \delta l)^{3/4}] - I_{\frac{2}{3}\frac{x}{\delta}}(A_1) I_{-\frac{x}{\delta}\frac{2}{3}} [A_1(1 - \delta l)^{3/4}]} \times \\ \times \left\{ T_k I_{\frac{2}{3}\frac{x}{\delta}} [A_1(1 - \delta l)^{3/4}] - T_{пл}(1 - \delta l)^{x/2\delta} I_{\frac{2}{3}\frac{x}{\delta}}(A_1) \right\} \times$$

$$\times I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} [A_1 (1 - \delta l)^{3/4}] + \left\{ T_{\text{пл}} (1 - \delta l)^{\frac{x}{2\delta}} I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} (A_1) - \right. \\ \left. - T_{\text{к}} I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} [A_1 (1 - \delta l)^{3/4}] \right\} I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} [A_1 (1 - \delta x)^{3/4}] \quad (3.5.8)$$

для $\frac{2}{3} \cdot \frac{x}{\delta}$ нецелого, и

$$T_1 = \frac{(1 - \delta x)^{-x/2\delta}}{I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} (A_1) K_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} [A_1 (1 - \delta l)^{3/4}] - K_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} (A_1) I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} [A_1 (1 - \delta l)^{3/4}]} \times \\ \times \left\{ T_{\text{к}} K_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} [A_1 (1 - \delta l)^{3/4}] - T_{\text{пл}} (1 - \delta l)^{x/2\delta} K_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} (A_1) \right\} \times \\ \times \left\{ I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} [A_1 (1 - \delta x)^{3/4}] + \left\{ T_{\text{пл}} (1 - \delta l)^{x/2\delta} I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} (A_1) - \right. \right. \\ \left. \left. - T_{\text{к}} I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} [A_1 (1 - \delta l)^{3/4}] \right\} K_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} [A_1 (1 - \delta x)^{3/4}] \right\} \quad (3.5.9)$$

для $\frac{2}{3} \cdot \frac{x}{\delta}$ целого.

В твердой фазе распределение температуры не отличается от найденного раньше.

При выводе уравнения для координаты изотермической границы фазового перехода используем следующие соотношения между бесселевыми функциями:

$$\Delta [I_\nu(Z) I_{-\nu}(Z)] = I_\nu(Z) I'_{-\nu}(Z) - I'_{\nu}(Z) I_{-\nu}(Z) = -\frac{2 \sin \nu \pi}{\pi Z}, \quad (3.5.10)$$

$$\Delta [I_\nu(Z) K_\nu(Z)] = I_\nu(Z) K'_\nu(Z) - I'_\nu(Z) K_\nu(Z) = -\frac{1}{Z}. \quad (3.5.11)$$

Тогда уравнение для фронта кристаллизации имеет вид

$$\left[\left(\frac{\lambda_1 v}{2a_1} - \lambda_2 \varepsilon_2 \right) T_{\text{пл}} - \rho v \gamma \right] \left\{ I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} (A_1) I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} [A_1 (1 - \delta l)^{3/4}] - \right.$$

$$\begin{aligned}
 & - I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} (A_1) I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} [A_1 (1 - \delta l)^{3/4}] \left\{ + \frac{3}{2} \frac{\lambda_1 \delta T_K}{2\pi (1 - \delta l)^{(x+2\delta)/2\delta}} \times \right. \\
 & \times \sin \frac{2x\pi}{3\delta} - \frac{3 \delta \lambda_1 T_{пл} A_1}{4 (1 - \delta l)^{1/4}} \left\{ I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} (A_1) I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} [A_1 (1 - \delta l)^{3/4}] - \right. \\
 & \left. \left. - I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} (A_1) I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} [A_1 (1 - \delta l)^{3/4}] \right\} = 0 \quad (3.5.12)
 \end{aligned}$$

для случая $\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}$ нецелого. При $\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}$ целом в уравнении (3.5.12) делается замена

$$I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} \rightarrow I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}}, \quad I_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}} \rightarrow K_{\frac{2}{3} \frac{x}{\delta}}, \quad \frac{3}{2\pi} \sin \frac{2}{3} \frac{x}{\delta} \pi \rightarrow -\frac{3}{4} \quad (3.5.13)$$

Уравнение (3.5.12) должно решаться совместно с уравнением

$$\frac{R^2}{R_0^2} = 1 - \delta l.$$

Эти уравнения представляют собой два уравнения связи для трех величин R , δ и l . Задание одной из них определяет оставшиеся две. Так, например, зная δ , можно определить положение фронта кристаллизации и радиус твердого стержня. Таким образом, теперь уже не только координата изотермической границы фазового перехода, но и радиус твердого стержня определяется параметрами жидкой фазы.

Случай $f(x) = (1 - \delta x)^2$.

Пусть теперь

$$f(x) = (1 - \delta x)^2. \quad (3.5.14)$$

Тогда

$$Z = \frac{1}{3\delta f^{3/2}} \quad (3.5.15)$$

и уравнение теплопроводности в жидкой фазе имеет вид

$$\frac{d^2 T_1}{dZ^2} - x \frac{dT_1}{dZ} - \frac{\beta}{Z^2} T_1 = 0, \quad (3.5.16)$$

где

$$\beta = \frac{S_1^2}{9c^2}.$$

Сравним это уравнение с уравнением

$$z^2 y'' - [(2a - 1) + 2bcz^c] zy' + [(a^2 - \nu^2 c^2) + (2a - c)bcz^c + (b^2 + d^2)c^2 z^{2c}] y = 0, \quad (3.5.17)$$

решение которого [29]

$$y = z^a e^{bz^c} z_\nu (dz^c). \quad (3.5.18)$$

Положим в уравнении (3.5.17) $c = 1$, $a = \frac{1}{2}$, $d = ib$. Тогда получим

$$b = \frac{\kappa}{2}, \quad \frac{1}{4} - \nu^2 = -\beta, \quad \sqrt{\beta + \frac{1}{4}} = \nu. \quad (3.5.17a)$$

Сравнивая (3.5.16) и (3.5.17a), находим

$$z^2 \frac{d^2 T_1}{dz^2} - 2bz^2 \frac{dT_1}{dz} + \left(\frac{1}{4} - \nu^2\right) T_1 = 0.$$

Следовательно, частным интегралом уравнения (3.5.16) будет

$$T_1^* = z^{\frac{1}{2}} e^{\frac{\kappa z}{2}} z_\nu \sqrt{\beta + \frac{1}{4}} \left(\frac{i\kappa z}{2}\right). \quad (3.5.19)$$

Возвращаясь к старой переменной, запишем общее решение уравнения (3.5.16) в виде

$$T_1 = \frac{1}{\sqrt{3\delta}} \cdot \frac{1}{(1-\delta x)^{3/2}} \exp\left[\frac{\kappa x}{6\delta(1-\delta x)^3}\right] \left\{ AI \sqrt{\beta + \frac{1}{4}} \left[\frac{\kappa x}{6\delta(1-\delta x)^3}\right] + \right. \\ \left. + BI - \sqrt{\beta + \frac{1}{4}} \left[\frac{\kappa x}{6\delta(1-\delta x)^3}\right] \right\} \quad (3.5.20)$$

для нецелого $\sqrt{\beta + \frac{1}{4}}$.

Для целого $\sqrt{\beta + \frac{1}{4}}$ нужно писать $K \sqrt{\beta + \frac{1}{4}} \left[\frac{\kappa x}{6\delta(1-\delta x)^3}\right]$ вместо бесселевой функции первого рода $I - \sqrt{\beta + \frac{1}{4}} \left[\frac{\kappa x}{6\delta(1-\delta x)^3}\right]$. Определяя постоянные A и B , окончательно находим

$$\begin{aligned}
T_1 = & \frac{\left\{ T_K \exp\left(-\frac{x}{6\delta}\right) I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right] - \right. \\
& \left. - T_{пл}(1-\delta l)^{3/2} \exp\left[-\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right] I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left(\frac{x}{6\delta}\right) \right\}}{I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left(\frac{x}{6\delta}\right) I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right] - I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left(\frac{x}{6\delta}\right) I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right]} \times \\
& \times \frac{1}{(1-\delta x)^{3/2}} \exp\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta x)^3}\right] I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta x)^3}\right] + \\
& \frac{T_{пл}(1-\delta l)^{3/2} \exp\left[-\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right] I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left(\frac{x}{6\delta}\right) -}{- T_K I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right] \exp\left(-\frac{x}{6\delta}\right)} \\
& + \frac{I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left(\frac{x}{6\delta}\right) I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right] - I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left(\frac{x}{6\delta}\right) I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right]}{I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left(\frac{x}{6\delta}\right) I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right] - I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left(\frac{x}{6\delta}\right) I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right]} \times \\
& \times \frac{1}{(1-\delta x)^{3/2}} \exp\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta x)^3}\right] I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta x)^3}\right]. \quad (3.5.21)
\end{aligned}$$

Распределение температуры в твердой фазе по-прежнему определяется известными формулами. А уравнение для координаты границы фазового перехода теперь будет

$$\begin{aligned}
& \left[\left(\frac{3\lambda_1\delta}{2(1-\delta l)} + \frac{\lambda_1 x}{2(1-\delta l)^4} - \lambda_2 \varepsilon_2 \right) T_{пл} - \rho \psi \gamma \right] \left\{ I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left(\frac{x}{6\delta}\right) \times \right. \\
& \times \left. I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right] - I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left(\frac{x}{6\delta}\right) I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right] \right\} + \\
& + \frac{\lambda_1 x T_{пл}}{2(1-\delta l)^4} \left\{ I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left(\frac{x}{6\delta}\right) I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right] - \right. \\
& \left. - I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left(\frac{x}{6\delta}\right) I_{-\sqrt{\beta+\frac{1}{4}}}\left[\frac{x}{6\delta(1-\delta l)^3}\right] + \frac{6\lambda_1\delta T_K}{\pi(1-\delta l)^{5/2}} \right\} \times
\end{aligned}$$

$$\times \exp \left[\frac{x - x(1 - \delta l)^2}{6\delta(1 - \delta l)^3} \right] \sin \pi \sqrt{\beta + \frac{1}{4}} = 0. \quad (3.5.22)$$

При целом $\sqrt{\beta + \frac{1}{4}}$ в уравнении (3.5.22) делается замена, аналогичная (3.5.13):

$$\begin{aligned} I \sqrt{\beta + \frac{1}{4}} &\rightarrow I \sqrt{\beta + \frac{1}{4}}; \quad I \sqrt{\beta + \frac{1}{4}} \rightarrow K \sqrt{\beta + \frac{1}{4}}, \\ \frac{\sin \pi \sqrt{\beta + \frac{1}{4}}}{\pi} &\rightarrow = -\frac{1}{2}. \end{aligned}$$

§ 6. Разрывы при микролитье в капилляр

При литье микропровода различают так называемые микроразрывы (точечные разрывы) и макроразрывы, легко наблюдаемые под микроскопом. На существование такого рода разрывов впервые указал В. В. Трояновский [30]. Эти явления объясняются как исходя из требования согласованности между внутренними параметрами процесса, так и на базе предыдущего анализа.

Рассмотрим поведение выражения (2.4.11) на фронте кристаллизации. Здесь имеем $x = R_k + l$, $\xi = R$. Так как $R_k > R$, то $\ln \frac{R_k}{R} > 0$ и, следовательно, нас удовлетворяют только те преобразования уравнения (2.4.11), при которых выполняется условие

$$1 + 2 \ln \frac{R_k}{R} > 1. \quad (3.6.1)$$

С учетом этого решая уравнения (3.1.11) относительно комплекса $1 + 2 \ln \frac{R_k}{R}$, после небольших преобразований получим соотношение

$$R = R_k \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{2 R_k l + l^2 - R^2}{l \sqrt{R_k^2 + R^2 + R^2 - R_k l}} \right\}, \quad (3.6.2)$$

которое является трансцендентным уравнением относительно радиуса металлической жилы в твердом состоянии. Его решение дает зависимость геометрии жилы от некоторого количества параметров, характеризующих физические свойства исходных материалов, а также от некоторых внешних параметров процесса, через которые выражается l .

Нарушение рассматриваемого процесса литья может быть, в частности, вызвано несогласованностью геометрии металлической жилы на фронте кристаллизации с геометрией стеклянного капилляра. Минимальный радиус капилляра, который заполняется в условиях несмачивающейся бифазы, определяется выражением (2.5.11).

Условие стабильности процесса литья состоит в том, чтобы радиус металлической жилы на фронте кристаллизации при нарушении смачиваемости был больше приведенного минимального радиуса капилляра

$$R(l) > R_{\min}. \quad (3.6.3)$$

Или, используя соотношение для l , находим

$$\begin{aligned}
 R = R_k \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[2 R_k \frac{1}{g - \frac{v}{2a}} \ln \frac{2 \lambda_g T_k}{2 \lambda_g T_{пл} - \rho v \gamma} + \right. \right. \\
 \left. \left. + \frac{1}{\left(g - \frac{v}{2a} \right)^2} \ln^2 \frac{2 \lambda_g T_k}{2 \lambda_g T_{пл} - \rho v \gamma} - R^2 \right] \times \right. \\
 \left. \times \left[\frac{\sqrt{R_k^2 + R^2}}{\left(g - \frac{v}{2a} \right)} \ln \frac{2 \lambda_g T_k}{2 \lambda_g T_k - \rho v \gamma} + R^2 - \frac{R_k}{g - \frac{v}{2a}} \times \right. \right. \\
 \left. \left. \times \ln \frac{2 \lambda_g T_k}{2 \lambda_g T_{пл} - \rho v \gamma} \right]^{-1} \right\} > \frac{2[\sigma^{oc}(T_{кр}) - \sigma^{cb}(T_{кр})]}{P_0 \sigma^{об}(T_{кр})} \times \\
 \times [\sigma^{об}(T_{кр}) + \sigma^{ом}(T_{кр})]. \quad (3.6.4)
 \end{aligned}$$

Последнее соотношение связывает между собой диаметр металлической жилы и достаточно большое число условий, характеризующих как свойства исходных материалов, так и режимы процесса. Нарушение условий (3.6.3) или (3.6.4) приводит к тому, что в металлической жиле образуются разрывы. Это связано с тем, что жидкий металл не может кристаллизоваться. Он находится в стеклянной луковиче, как в воронке, не выливаясь из нее и не достигая фронта кристаллизации. В результате этого при больших скоростях литья вытягиваются достаточно длинные отрезки пустого капилляра.

Другой возможной причиной нарушения целостности металлической жилы является переохлаждение жидкой фазы. При неизменных условиях микролитья увеличение скорости вытягивания приводит, с одной стороны, к росту координаты фронта фазового перехода и, с другой стороны, к углублению температурного минимума, к большим переохлаждениям жидкого металла. До определенных величин переохлаждение, вообще говоря, является положительным фактором, благоприятствующим процессу литья микропровода, кристаллизация из переохлажденного расплава носит стабильный характер.

С точки зрения кинетики переохлаждение учитывается специальным кинетическим коэффициентом D , имеющим размерность см/град \times сек. и характеризующим склонность вещества к переохлаждению [31]. В кинетике показывается, что при достижении больших переохлаждений в расплаве возникают спонтанные центры кристаллизации, ведущие к образованию новых фронтов кристаллизации.

Жидкий металл в стеклянном капилляре, находясь между двумя такими фронтами кристаллизации, будет стягиваться к ним при затвердевании. Это приводит к образованию точечных разрывов металлической нити, так называемых микропазлов, которые существенно отличаются от рассмотренных выше «макропазлов». При этом в зависимости от условий литья рост координаты фронта фазового перехода, приводя к нарушению неравенства (3.6.3), может оказывать более сильное влияние на процесс образования микропровода, и макропазлы будут единственно наблюдаемыми. Следует заметить, что возникновение резонансных явлений типа резонансной кристаллизации также приводит к обрыву металлической жилы.

Анализ причин нарушения целостности металлической нити в стеклянном капилляре позволяет наметить пути устранения разрывов в процессе литья. Последнее может быть достигнуто уменьшением величины координаты фронта кристаллизации и снижением глубины переохлаждения жидкой фазы. И то и другое требует увеличения теплоотвода с наиболее «горячих» участков микропровода, т. е. с участков, наиболее близких к нижнему основанию капли. Осуществление этого возможно при помощи различных технических средств, в частности, применением более широкой и более холодной струи кристаллизующей жидкости, теплоотдача к которой будет достаточно велика. Отметим также, что указанное увеличение теплоотвода позволит, по-видимому, интенсифицировать рассматриваемый процесс микролитья и довести скорость вытягивания до 500—600 м/мин и выше.

Другой возможностью интенсификации процесса микролитья в капилляр является увеличение давления над каплей с одновременным увеличением скорости вытягивания и изменением положения кристаллизующей струи. Применение этого способа позволит изменить величину R_{min} и тем самым совместно с другими технологическими приемами создать, по-видимому, возможности для получения более тонкого, т. е. более высокоомного микропровода.

§ 7. Переходные режимы и обрыв процесса

Рассмотрим теперь нестационарный тепловой режим, связанный, например, с тепловым переходом системы из одного квазистационарного состояния в другое под влиянием изменения температуры на свободной границе жидкой фазы. Такой переход в приближении безградиентного течения жидкости определяется двумя уравнениями теплопроводности, записанными в l -системе координат:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 T_1}{dx^2} - \frac{v}{a_1} \frac{dT_1}{dx} - S_1^2 T_1 &= \frac{1}{a_1} \frac{dT_1}{d\tau}, \quad [0 \leq x \leq l(\tau)]_2 \\ \frac{d^2 T_2}{dx^2} - \frac{v}{a_2} \frac{dT_2}{dx} - S_2^2 T_2 &= \frac{1}{a_2} \frac{dT_2}{d\tau}, \quad [l(\tau) \leq x \leq \infty], \end{aligned} \quad (3.7.1)$$

при начальных условиях

$$T_1|_{\tau=0} = f(x), \quad T_2|_{\tau=0} = \varphi(x), \quad l(\cdot)|_{\tau=0} = l_0 \quad (3.7.2)$$

и граничных условиях

$$\begin{aligned} T_1|_{x=0} &= T_K; \quad T_1|_{x=l(\tau)} = T_2|_{x=l(\tau)} = T_{пл}, \\ \left[\lambda_1 \frac{dT_1}{dx} - \lambda_2 \frac{dT_2}{dx} \right]_{x=l(\tau)} &= \rho\gamma \left(v - \frac{dl}{d\tau} \right), \\ T_2|_{x \rightarrow \infty} &\rightarrow 0. \end{aligned} \quad (3.7.3)$$

Описание переходного режима стержня сводится к определению функций $T_1(x, \tau)$; $T_2(x, \tau)$ и закона движения изотермической границы фазового перехода (волны кристаллизации) $l(\tau)$. Из-за наличия краевых условий на неизвестной подвижной границе поставленная задача является существенно нелинейной. Поэтому решение такого рода задач в замкнутом виде можно получить только в специальных случаях для некоторых простых систем, например, для неподвижного полупространства.

Решение задачи (3.7.1)—(3.7.3) при линеаризации краевых условий на плоскости фронта кристаллизации дано в [32, 33]. Однако наши цели удовлетворит и качественный анализ сформулированной задачи. Полученные в [32, 33] приближенные полуаналитические решения и функции Грина динамического уравнения теплопроводности позволяют свести задачу об отыскании закона движения фронта фазового перехода к некоторому интегральному уравнению по методу, разработанному в [34]. Действительно, температура в плоскости x в момент времени τ , обусловленная наличием источника тепла $\rho\gamma(v - \frac{dl}{d\tau})$, определяется соотношением

$$T_x^1 = \frac{\gamma}{2c\sqrt{\pi a}} \int_0^{\tau} \frac{(v - l(\eta))}{\sqrt{\tau - \eta}} e^{-as^2(\tau - \eta)} \times$$

$$\times \left\{ e^{-\frac{[x-v(\tau-\eta)-l(\eta)]^2}{4a(\tau-\eta)}} - e^{-\frac{v}{a}l(\eta)} e^{\frac{[x-v(\tau-\eta)+l(\eta)]^2}{4a(\tau-\eta)}} \right\} d\eta, \quad (3.7.4)$$

где для простоты начало координат помещено в l_0 и константы жидкости и твердого тела приняты равными друг другу. Температура в плоскости x в момент времени τ , обусловленная деформацией начальной температуры поля, будет

$$T_x'' = \frac{1}{2} T_{\text{пл}} \left\{ \exp \varepsilon x \Phi^* \left[\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \sqrt{ag^2\tau} \right] + \exp kx \Phi \left[\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \sqrt{ag^2\tau} \right] \right\}. \quad (3.7.5)$$

Температура в плоскости x в момент времени τ равна сумме (3.7.4) и (3.7.5). Следовательно, на фронте кристаллизации она равна

$$T_\Phi = \frac{T_{\text{пл}}}{2} \left\{ e^{l(\tau)} \Phi^* \left[\frac{l(\tau)}{2\sqrt{a\tau}} - \sqrt{ag^2\tau} \right] + e^{k l(\tau)} \Phi \left[\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \sqrt{ag^2\tau} \right] \right\} + \\ + \frac{\gamma}{2cV\pi a} \int_0^\tau \frac{v-l(\eta)}{\sqrt{\tau-\eta}} \cdot e^{-aS^2(\tau-\eta)} \times \\ \times \left\{ e^{-\frac{[l(\tau)-v(\tau-\eta)-l(\eta)]^2}{4a(\tau-\eta)}} - e^{-\frac{v}{a}l(\eta)} e^{-\frac{[x-v(\tau-\eta)+l(\eta)]^2}{4a(\tau-\eta)}} \right\} d\eta. \quad (3.7.6)$$

При $T_\Phi = T_{\text{пл}}$ соотношение (3.7.6) является интегральным уравнением для определения $l(\tau)$. Если полагать, что скорость движения фронта кристаллизации является функцией смещения температуры на фронте от равновесной термодинамической температуры существования фаз, то для анализа возможного переохлаждения на границе раздела получаем такое интегро-дифференциальное уравнение:

$$\frac{dl}{d\tau} = \varphi(T_{\text{пл}} - T_\Phi), \quad (3.7.7)$$

где вид функции φ должен быть найден из эксперимента. Однако решение уравнений (3.7.6) и (3.7.7) в обозримой форме не представляется возможным. Анализ асимптотики нелинейного уравнения (3.7.7) в случае $v=0$ был дан Б. Я. Любовым [35]. В нашем случае асимптотика этого уравнения физически прозрачна, так как имеется стационарное состояние с $T = T_{\text{пл}}$.

Для дальнейшего анализа рассмотрим некоторые общие свойства температурных функций нестационарной задачи (3.7.1)–(3.7.3). Из физического смысла ее следует

$$\left. \frac{dl}{d\tau} \right|_{\tau=0} = 0, \quad \left. \frac{dl}{d\tau} \right|_{\tau \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \quad (3.7.8)$$

При непрерывности $l(\tau)$ это означает, что внутри промежутка (l_0, l_k) функция $l(\tau)$ имеет точку перегиба, в которой

$$\frac{dl}{d\tau} = \max, \quad \frac{d^2l}{d\tau^2} = 0. \quad (3.7.9)$$

Естественно, что из общих соображений нельзя определить координату точки, в которой абсолютная величина скорости движения фронта фазового перехода становится максимальной.

Обратимся, однако, к краевому условию типа Стефана и, относя все величины к фронту кристаллизации, запишем его:

$$\frac{dl}{d\tau} = v - \frac{1}{\rho\gamma} \left[\lambda_1 \frac{dT_1}{dx} - \lambda_2 \frac{dT_2}{dx} \right]. \quad (3.7.10)$$

Рассмотрим два случая. Пусть сначала температура капли будет возрастающей функцией времени. Тогда $\frac{dl}{d\tau} > 0$, и в точке перегиба

$$\left[\lambda_1 \frac{dT_1}{dx} - \lambda_2 \frac{dT_2}{dx} \right] = \min. \quad (3.7.11)$$

Это означает, что температурный градиент в твердой фазе растет быстрее, чем в жидкой. Расстояние между точкой температурного минимума и фронтом фазового перехода увеличивается; волна переохлаждения отстает от волны кристаллизации. Переход жидкости из переохлажденного состояния в твердое тело становится менее резким. Следовательно, обрыв процесса в этом случае возможен вследствие несогласованности между геометрией жилы и капилляра на фронте фазового перехода, в связи со значительным увеличением l и нарушением смачиваемости. В то же время быстрый рост температурного градиента в твердой фазе вблизи фронта кристаллизации приводит к большим температурным напряжениям в микропроводе и создает условия для образования трещин в стеклянной изоляции.

Пусть теперь температура капли будет убывающей функцией времени. Тогда $\frac{dl}{d\tau} < 0$ и в точке перегиба скорость движения фронта фазового перехода имеет отрицательный экстремум. В этом случае

$$\left[\lambda_1 \frac{dT_1}{dx} - \lambda_2 \frac{dT_2}{dx} \right] = \max.$$

Это означает, что $\frac{dT_1}{dx}$ имеет максимум. При наличии в исходном состоянии переохлажденной жидкости этот факт можно интерпретировать, по-видимому, следующим образом. Вследствие того что движение волны переохлаждения и волны кристаллизации происходит с различными скоростями, расстояние между $l(\tau)$ и x_{\min} уменьшается. Волна пере-

охлаждения частично поглощается на фронте кристаллизации. Это приводит к тому, что в определенный момент времени жидкость резко переходит из переохлажденного состояния в твердое тело. Иными словами, в этом случае вблизи фронта фазового перехода в жидкой фазе имеется достаточно большой температурный градиент. После перехода через точку перегиба расстояние между $l(\tau)$ и x_{\min} вновь начинает увеличиваться: фронт кристаллизации как бы «отражает» волну переохлаждения.

В случае же отсутствия переохлажденной жидкости в начальном и конечном квазистационарных состояниях можно предположить ее возникновение в нестационарном режиме, после чего начинает действовать описанный механизм с той только разницей, что обратного порождения волны переохлаждения после ее поглощения на фронте кристаллизации не происходит.

Отметим, что в рассматриваемом случае состояние микропровода в момент, когда $l(\tau)$ проходит точку перегиба, является неустойчивым и положение фронта кристаллизации будет нестабильным. Он может самопроизвольно, в силу случайных причин, поменять свое положение, вследствие чего и произойдет обрыв процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Лыков. Теплопроводность нестационарных процессов. М., ГЭИ, 1948.
2. А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. Уравнения математической физики, Гостехиздат, 1951.
3. Г. Н. Дульнев. Теплообмен радиоэлектронных устройств. М., ГЭИ, 1963.
4. Г. Н. Дульнев, А. Э. Семяшкин. Теплообмен радиоэлектронных аппаратов. М., ГЭИ, 1964.
5. И. С. Березин, Н. П. Жидков. Вычислительная математика. М., Физматгиздат, 1962.
6. В. П. Матвеев, В. Н. Миллявская. Электродинамические явления в электромагнитной системе индуктор—капля при производстве микропровода в стеклянной изоляции. Достижения в области разработки, производства и применения микропровода в стеклянной изоляции. М., ЦИНТИ Электропром, 1962, 40—54.
7. А. М. Марютин. Об охлаждении капли при заправке микрованны в процессе литья микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. III. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965, 31—37.
8. Л. П. Менчиков, В. К. Бояришинов, Е. Л. Окунь, М. А. Вальгина. О тепловом балансе системы расплав—среда при литье микропроводов в стеклянной изоляции. Электронная техника, вып. 1, 1967, 109—115.
9. В. К. Бояришинов, М. А. Вальгина, М. Е. Белоус. Температурное поле расплава капли и конусов растягивания стекла при литье микропровода. Электронная техника, вып. 1, 1967, 126—137.
10. Л. С. Эйгенсон и др. Термические основы формирования стекла. М., Госстройиздат, 1959.
11. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. М., ГИТТЛ, 1965.
12. А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. Теория тепло- и массопереноса. М., ГЭИ, 1964.
13. Е. Карслоу, Д. Егер. Теплопроводность твердых тел. Перевод под редакцией профессора А. А. Померанцева. М., «Наука», 1964.

14. *Е. Я. Бадинтер, Н. Р. Берман.* Стационарная теплопроводность микропровода в процессе литья. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 3. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1965, 38—46.
15. *Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц.* Механика сплошных сред. М., ГИТТЛ, 1954.
16. *Н. Р. Берман, Е. М. Лыско.* Кристаллизация микропровода в процессе литья. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 3. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1965, 47—55.
17. *В. С. Чиркин.* Теплофизические свойства материалов. М., Физмагиз, 1959.
18. *В. С. Чиркин.* Теплопроводность промышленных материалов. М., Машгиз, 1962.
19. *М. А. Михеев.* Основы теплопередачи. М., ГЭИ, 1956.
20. *Н. Р. Берман.* К теории кристаллизации тонкого движущегося стержня (динамическая задача типа Стефана). Кандидатская диссертация. М., 1968.
21. *Г. А. Остроумов.* К теории тепловых процессов при жидком волочении проволоки в стационарном режиме. ЖТФ, ХХІХ, № 2, 1959, 239—246.
22. *Н. Р. Берман.* Об одной задаче типа Стефана. Изв. АН МССР, серия матем. № 4, 1966, 39—43.
23. *Н. Р. Берман, Л. М. Непритворенная.* Кристаллизация движущегося стержня в струе жидкости. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 6. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1967, 24—32.
24. *Н. Р. Берман.* К задаче охлаждения жидкого стержня при линейном изменении внешней температуры. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 5. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1966, 37—45.
25. *Н. Р. Берман.* Кристаллизация тонкого движущегося стержня в среде переменной температуры. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 5. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1967, 32—39.
26. *Н. Р. Берман.* Резонансная кристаллизация тонкого движущегося стержня. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 5. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1967, 40—44.
27. *Н. Р. Берман.* К обобщенной задаче типа Стефана. Матем. исслед. т. II, вып. 1. Кишинев, РИО АН МССР, 1967, 117—123.
28. *Б. Г. Корнев.* Некоторые задачи теории упругости и теплопроводности, решаемые в бесселевых функциях. М., Физматгиз, 1960.
29. *Э. Камке.* Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М., «Наука», 1965.
30. *В. В. Трояновский.* Развитие метода изготовления сверхтонких проволок непосредственно из жидкого металла. Достижения в области разработки, производства и применения микропроволоки в стеклянной изоляции. М., ЦИНТИ Электропром, 1962.
31. *Б. И. Бирман.* Рост кристаллов, 5. Изд.-во АН СССР, 1965.
32. *Н. Р. Берман, А. Е. Маринчук.* К теории кристаллизации движущегося стержня. Труды Кишиневского политехн. ин-та. Проблемы механики и машиностроения, вып. VI, 1967.
33. *Н. Р. Берман, В. Г. Чебан.* Об одной динамической задаче кристаллизации. Изв. АН МССР, серия физич., 1967, № 6.
34. *Lightfoot,* Proc. Lond. Math. Soc., 3, 1930.
35. *Б. Я. Любов.* Рост кристаллов, 5. Изд.-во АН СССР, 1965.

ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО МИКРОПРОВОДА В СТЕКЛЯННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Для осуществления технологического процесса литья микропровода используется стандартное и специализированное оборудование, приборы контроля и управления. В качестве источников питания для установок литья микропровода применяются ламповые генераторы с колебательной мощностью от 3 до 10 квт и рабочей частотой 440 и 880 кГц.

Из всего разнообразия технологического оборудования, используемого в производстве микропровода, рассматриваются установки типа АЛМ-5.

Учитывая сложную зависимость качественных показателей микропровода от некоторых факторов технологического процесса его производства, в настоящей главе подробно рассматриваются методы выбора основных технологических режимов процесса литья медного и манганинового микропроводов, определены условия, обеспечивающие максимальную производительность процесса, рассмотрены условия подбора исходных материалов и методы статистического анализа, планирования труда и организации производства микропровода.

§ 1. Технологическое оборудование участков литья микропровода в стеклянной изоляции

На рис. 48 представлена установка типа УПМ-3 для литья микропровода из различных материалов и сплавов с диаметром жилы от $2 \div 3$ до $25 \div 30$ мкм, разработанная Институтом металлургии им. А. А. Байкова АН СССР при непосредственном участии А. В. Улитовского [1—7]. При создании установки типа УПМ-3 в качестве источника высокочастотной энергии в свое время использовался серийный высокочастотный ламповый автогенератор типа ЛГЗ-10А [4—8]. Установка типа УПМ-3 содержит одновитковый индуктор с каналами для обду-

ва микрованны, механизмы подачи стекла и шихтового металла, кристаллизатор для охлаждения микропровода водой или маслом и два спаренных одношпindelных приемных механизма. Для контроля за непрерывностью металлической жилы в стеклянной оболочке получае-

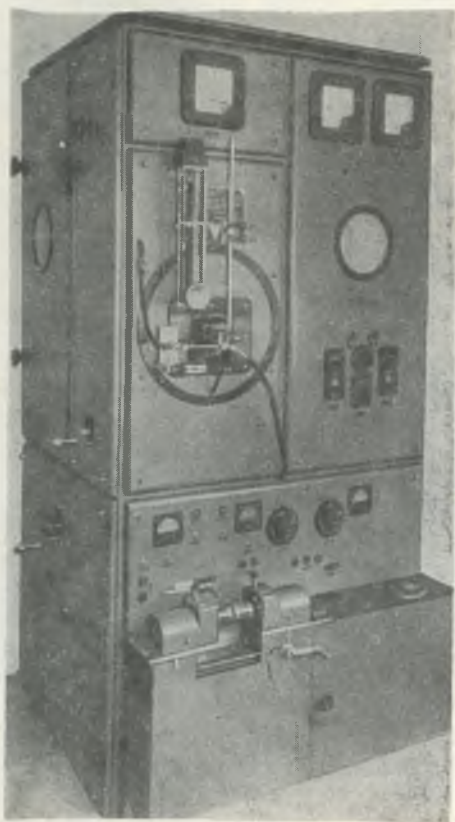


Рис. 48. Установка типа УПМ-3 для литья микропровода в стеклянной изоляции

мого микропровода в качестве индикатора процесса в установке УПМ-3 впервые было успешно использовано радиопередающее и приемное устройство (рис. 49). Однако в силу конструктивных и технических недостатков, несовершенства исполнительных механизмов, отсутствия средств контроля технологических режимов и размеров получаемого микропровода установка типа УПМ-3 в промышленности не используется.

На рис. 50 представлена установка для литья микропровода из резистивных металлов и сплавов с диаметром жилы менее 15 мкм. Эта установка смонтирована на базе ВЧГ типа ЛЗ-13, на лицевой панели которого по оси плавильного индуктора расположены отдельные приборы и механизмы, предназначенные для выполнения технологических операций процесса литья микропровода «капельным» способом. Приемный механизм установки (рис. 51) имеет многшпindelную фрикционную приемную головку с ручным переводом бобин. В ряде случаев указанные установки оснащаются блоком контроля погонного сопротивления (БКС) получаемого микропровода в виде приставки к

ВЧГ [9]. Выбор электрических режимов работы системы индуктор—микрованна в установках (рис. 50) осуществляется изменением связи между первичной и вторичной обмотками высокочастотного трансформатора, путем перемещения первичной обмотки с помощью ручного привода, пары косозубых шестеренок и ходового винта. Подобная регулировка электрических режимов ВЧГ является одним из существеннейших недостатков рассматриваемых установок литья микропровода. Она приводит к завышению допустимых норм отклонения утвержденной рабочей частоты ($440 \pm 2,9\%$; $880 \pm 1\%$), исключает возможность воспро-

изводимости условий процесса на двух разных установках. К недостаткам установок (рис. 50) следует отнести также отсутствие у них какой-либо стабилизации анодного напряжения, низкий коэффициент использования потребляемой мощности, несовершенство конструкций и

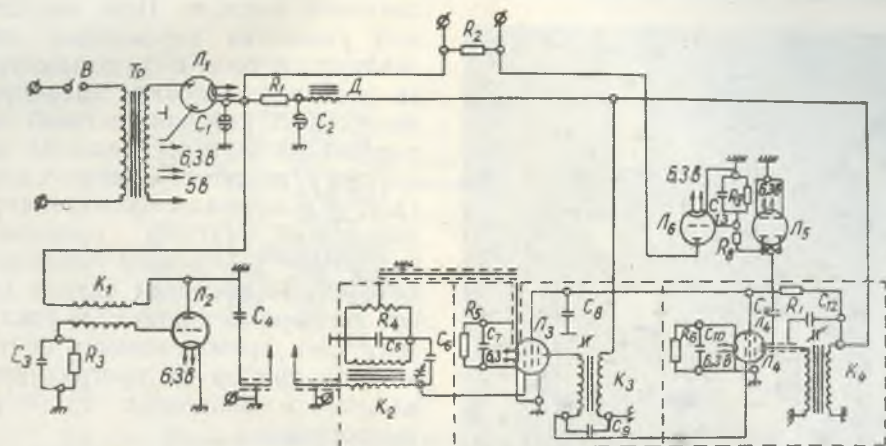


Рис. 49. Принципиальная схема передатчика и приемника для контроля непрерывности металлической жилы в процессе литья на установке типа УПМ-3

малая надежность исполнительных механизмов. Как показывают исследования и теоретические расчеты для установок литья микропровода рассматриваемого типа с колебательной мощностью 10 квт, к.п.д. с учетом потерь на генераторной лампе, выпрямителе и силовом трансформаторе составляет

$$\eta_1 = \frac{P_{\text{микроволны}}}{P_{\text{сети}}} \cdot 100\% = 1,2 \div 1,7\%.$$

В производстве медного микропровода с диаметром жилы более 20 мкм «непрерывным» способом известно использование установки типа УМ-1, разработки СКТБ МП (рис. 52, 53). Установки типа УМ-1 состоят из двух частей: ВЧГ типа ЛЗ-12 с соответствующими исполнительными механизмами на лицевой панели и поста управления, содержащего стабилизатор анодного напряжения типа САН-57 [10]. Для контроля получаемого микропровода с диаметром жилы более 50 мкм установки типа УМ-1 оснащаются фотоэлектронным микрометром типа ФЭМ-4, ФЭМ-5 и Е1-1 (рис. 54) [11, 12]. Указанные приборы работают по принципу сравнения на катоде фотоэлемента двух световых потоков. В приборе типа ФЭМ-4 световой поток от лампы накаливания 1, проходя через линзу 2, преобразуется и, попадая на диафрагму 5, делится на два потока: эталонный 5а и рабочий 5б. При прохождении контролируемого микропровода 9 сквозь рабочий световой по-

ток 10, линза 11 фокусирует оба световых потока на поверхности катода фотоэлемента 12. Одновременно вибратор 3 электро-механического модулятора 4, колеблясь в плоскости, перпендикулярной оптической оси, осуществляет попеременное, частичное перекрытие обоих световых потоков. При нарушении равенства переменных составляющих тока в фотоэлементе, за счет прохождения микропровода сквозь рабочий световой поток или за счет перемещения за-слонки 6 микрометрического винта 7, 8 в нагрузку фотоэлемента появляется сигнал, пропорциональный разбалансу световых потоков. Полученный сигнал после увеличения с помощью усилителя 13 и преобразования поступает на прибор 14, проградуированный в значениях диаметра микропровода.

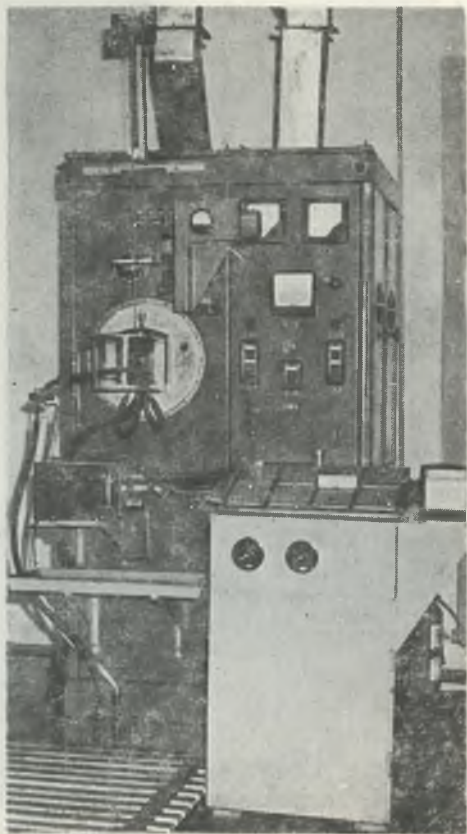


Рис. 50. Установка для литья микропровода в стеклянной изоляции, смонтированная на базе ВЧГ типа ЛЗ-13

назначенную для литья микропровода из различных металлов и сплавов как «капельным», так и «непрерывным» способом [19—18]. Установка типа АЛМ-5, в отличие от известных типов, выполняется в двухпостовом варианте с распределением колебательной мощности питающего ВЧГ типа ЛЗ-13 на два индуктора (рис. 57) [19, 20]. Для этого колебательный контур питающего ВЧГ вынесен из генератора и смонтирован в корпусе установки. Связь колебательного контура установки

В процессе работы фотоэлектронный микрометр показывает отклонения диаметра получаемого микропровода от заданного по шкале номинального значения с погрешностью ± 2 мкм. К числу существенных недостатков рассмотренных фотоэлектронных микрометров следует отнести их чувствительность к вибрации микропровода при больших скоростях приема, большую погрешность показаний и почти полную непригодность к использованию при охлаждении его вязкими маслами и эмульсиями.

Рассмотрим далее установку типа АЛМ-5 (рис. 55 и 56), пред-

с генераторной лампой по анодной и сеточным цепям обеспечивается высокочастотными кабелями [21].

Конструктивно установка представляет собой самостоятельный агрегат со сварным корпусом из конструкционной стали обычных про-

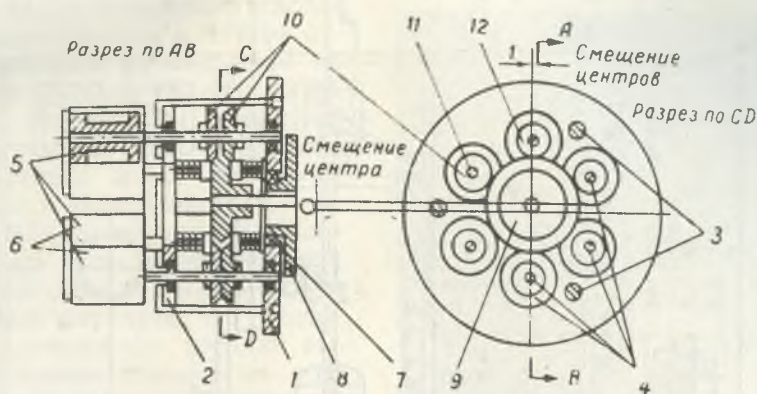


Рис. 51. Кинематическая схема головки приемного механизма с фрикционным приводом шпинделей приемных бобин:

1 — основание; 2 — стойка; 3 — упор; 4 — ось; 5 — катушка; 6 — сменная приемная бобина; 7 — подшипник; 8 — фланец; 9 — ведущий конический фрикционный диск; 10 — разжимные диски; 11 — прижим; 12 — фрикцион

филей. Корпус установки со всех сторон защищен стальными штампованными панелями, высокочастотный отсек экранирован дюралюминиевой обшивкой. Установка подключается к стабилизированной сети электропитания и цеховой системе водяного охлаждения (рис. 58). Работа исполнительных механизмов установки осуществляется с помощью автономной системы масляного питания.

Основные технические данные установки

- | | |
|--|--|
| 1. Количество рабочих постов — 2; | 7. Диапазоны скоростей подачи стекла, мм/мин — $0,5 \div 50$; |
| 2. Питающая сеть, в — $220 \pm 1\%$ ($380 \pm 1\%$); | 8. Диапазон скоростей приема микропровода, м/мин — $16 \div 800$; |
| 3. Потребляемая мощность, макс., квт — 18,5; | 9. Пределы измерения погонного сопротивления получаемого микропровода, ком/м — $3 \div 400 \pm 20\%$; |
| 4. Колебательная мощность вторичного контура, макс., квт — 10,0; | 10. Габариты, мм — $2100 \times 1100 \times 2300$; |
| 5. Рабочая частота, кгц — $440 \pm 2,5\%$ ($880 \pm 1\%$); | 11. Масса, кг — 800; |
| 6. Диапазон скоростей подачи шихтового металла, мм/мин — $10 \div 200$; | 12. Допустимое отдаление от источника питания высокочастотной энергией, макс., м — 12 |

Механизм подачи шихтового металла (рис. 59) в установке типа АЛМ-5 выполнен в виде многоступенчатого редуктора, совмещенного с коробкой скоростей, и системой валиков отбора мощности и роликов,

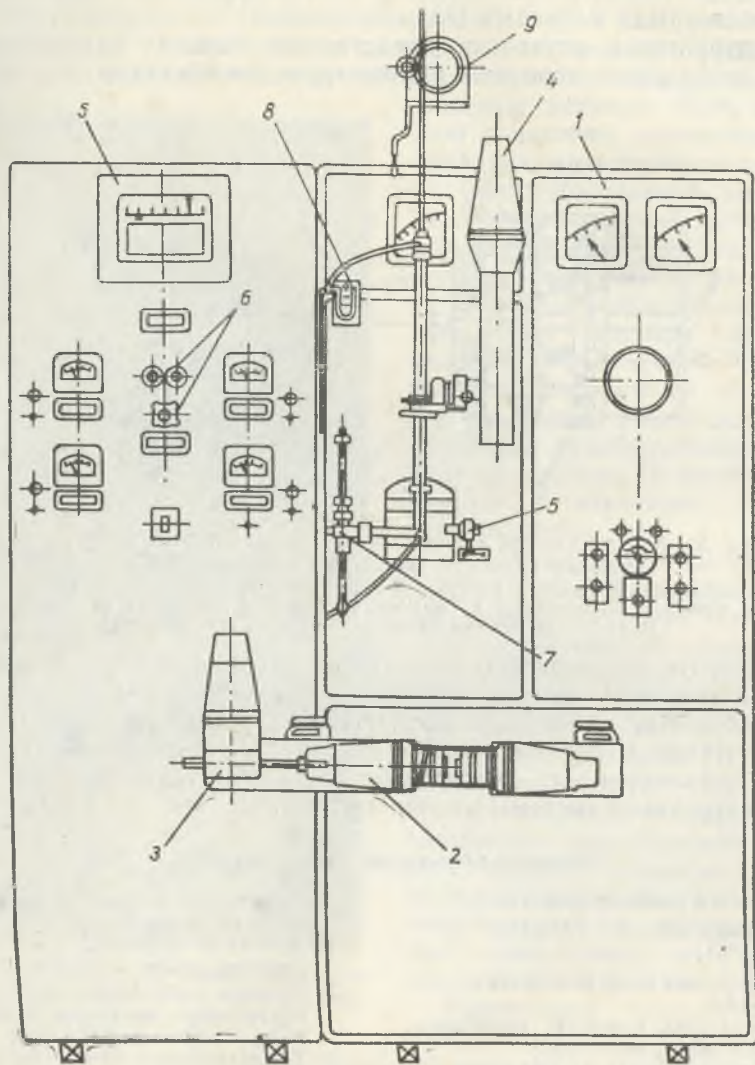


Рис. 52. Принципиальная схема установки типа УМ-1 для литья микропровода в стеклянной изоляции:

- 1 — приборы контроля режимов работы ВЧГ; 2 — приемный механизм; 3 — привод раскладки; 4 — механизм подачи стекла; 5 — потенциометр; 6 — счетчик длины получаемого микропровода; 7 — кристаллизатор; 8 — моновacuуметр; 9 — механизм подачи шихтового металла

тянущих шихтовый металл. Как видно из рис. 59, редуктор механизма состоит из набора последовательно соединенных блоков цилиндрических шестерней с i между каждой ступенью, равной 6,25, и $i_{\text{общ}} \approx 60\,000$. Для отбора мощности на валики привода роликов, тянущих шихтовый металл, в механизме используется передвижная шестерня отбора мощности, размещаемая на одном из валиков привода. При наладке механизма, исходя из технологических режимов, шестерня отбора мощности может вводиться в зацепление с любым четным блоком редуктора. Валики привода выполняются из двух частей, соединенных между собой с помощью шарниров, что обеспечивает возможность посадки выходных концов валиков на подвижные опоры, сжимаемые к центру рессорными пружинами. Это исключает переналадку механизма при использовании шихтового металла различных размеров, повышает стабильность подачи шихтового металла независимо от дефектов его поверхности. В верхней части механизма над тянущими роликами располагается катушка с шихтовым металлом. Для уменьшения емкостной связи шихтового металла с корпусом механизма тянущие ролики изолируются от валиков, а катушка шихтового металла изготавливается из диэлектрика. В нижней части механизма под его тянущими роликами размещается изолированное от корпуса устройство, обеспечивающее направление шихтового металла в микрованну и корректировку уровня контакта, идущего к блоку контроля погонного сопротивления (БКС), получаемого микропровода.

Весь механизм комплектуется в цельнолитом дюралюминиевом корпусе и работает в масляной ванне. Развертка окружности тянущих роликов по точкам охвата шихтовой проволоки равна 100 мм, указанный размер рекомендуется сохранять при замене роликов и ремонте

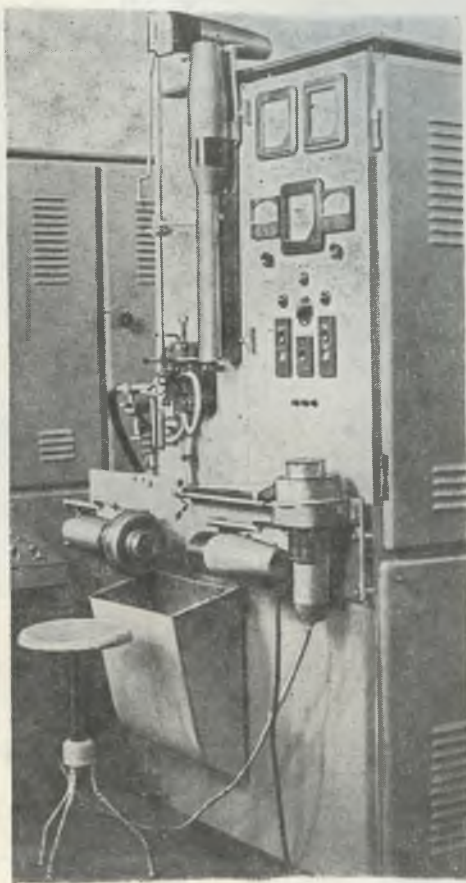


Рис. 53. Установка типа УМ-1 для литья микропровода в стеклянной изоляции (без поста управления)

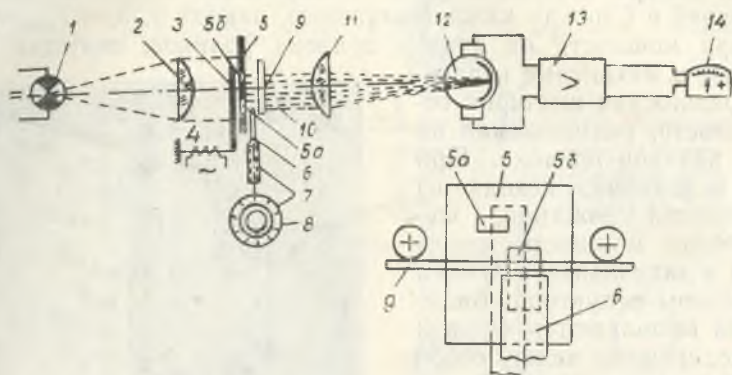


Рис. 54. Принципиальная схема фотоэлектронного микрометра типа ФЭМ-4

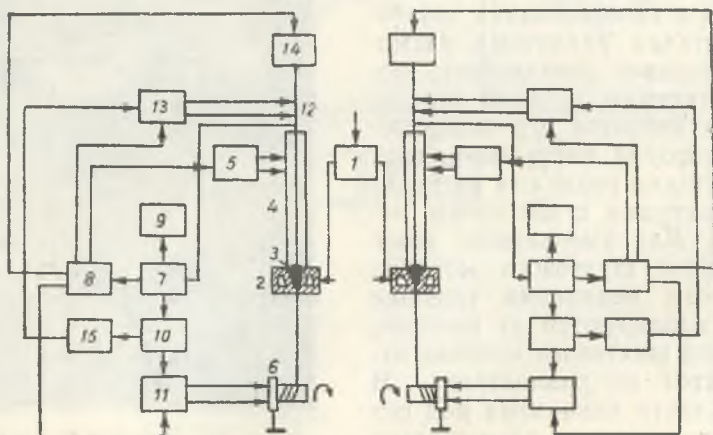


Рис. 55. Блок-схема двухпостовой установки типа АЛМ-5 для литья микропровода в стеклянной изоляции:

1 — высокочастотный трансформатор ВЧГ с двумя вторичными обмотками; 2 — однофазный индуктор; 3 — микрованна; 4 — стеклянная трубка; 5 — механизм подачи стекла; 6 — приемная bobина; 7 — блок контроля погонного сопротивления микропровода; 8 — задатчик процесса; 9 — регистрирующий прибор; 10 — индикатор процесса; 11 — механизм приема микропровода; 12 — шихтовой металл; 13 — механизм подачи шихтового металла; 14 — система пневматической регулировки уровня микрованна относительно индуктора; 15 — блок управления

механизма для удобства расчета расхода шихтового металла и шкалы контрольного прибора.

Механизм подачи стекла (рис. 60) в установке типа АЛМ-5 конструктивно выполнен подобно механизму подачи шихтового металла и отличается от него лишь тем, что на выходных концах валиков отбора мощности тянущие ролики подачи стекла имеют храповое зацепление. Подобное устройство тянущих роликов обеспечивает возможность ручной корректировки уровня стекла по отношению индуктора

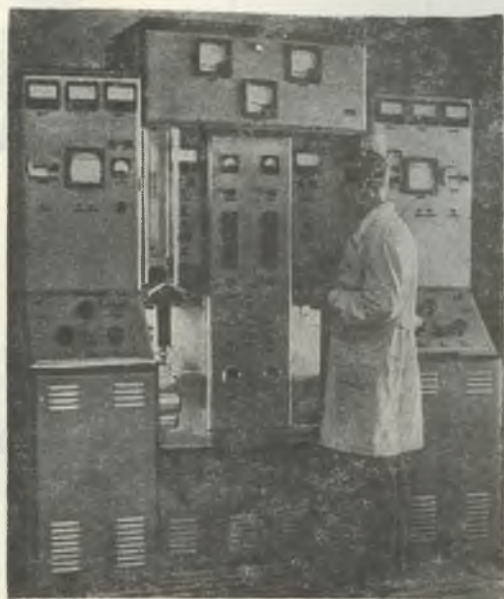


Рис. 56. Установка типа АЛМ-5 для литья микропровода в стеклянной изоляции (в работе)

в период наладки процесса. Расчет прибора, контролирующего скорость подачи стекла с помощью рассматриваемого механизма, производится по стеклянной трубке среднего размера из расчета, чтобы развертка окружности тянущих роликов по точкам обжима трубки равнялась 100 мм.

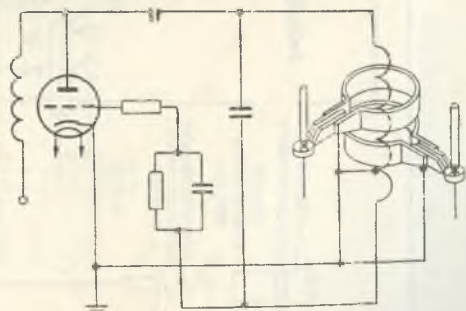


Рис. 57. Принципиальная схема лампового автогенератора, питающего установку типа АЛМ-5, с распределением мощности на два индуктора

Механизм приема микропровода в установке типа АЛМ-5 представляет собой универсальное устройство, рассчитанное на работу в широком диапазоне скоростей литья [22—29]. Конструктивно механизм выполнен таким образом, что может быть свободно встроенным

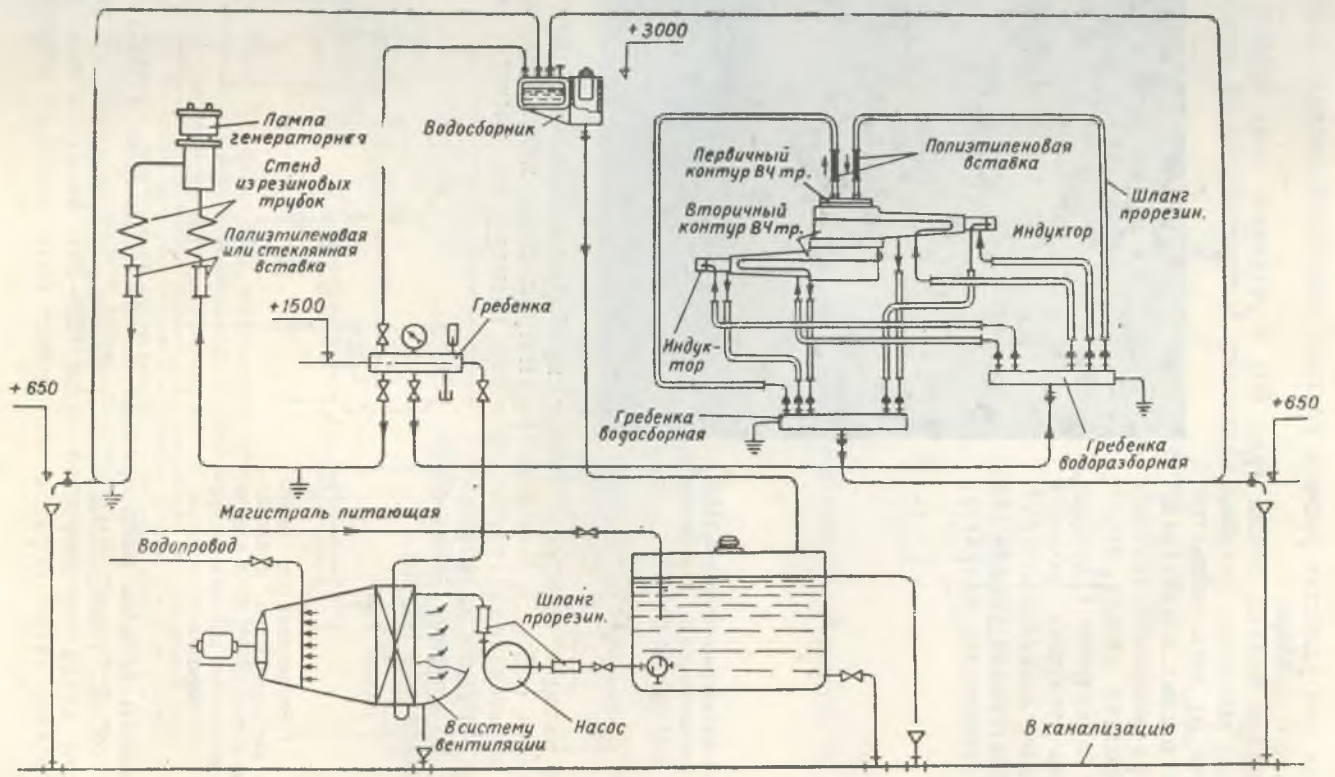


Рис. 58. Принципиальная схема системы водяного охлаждения участка литья микропровода, оснащенного установками типа АЛМ-5

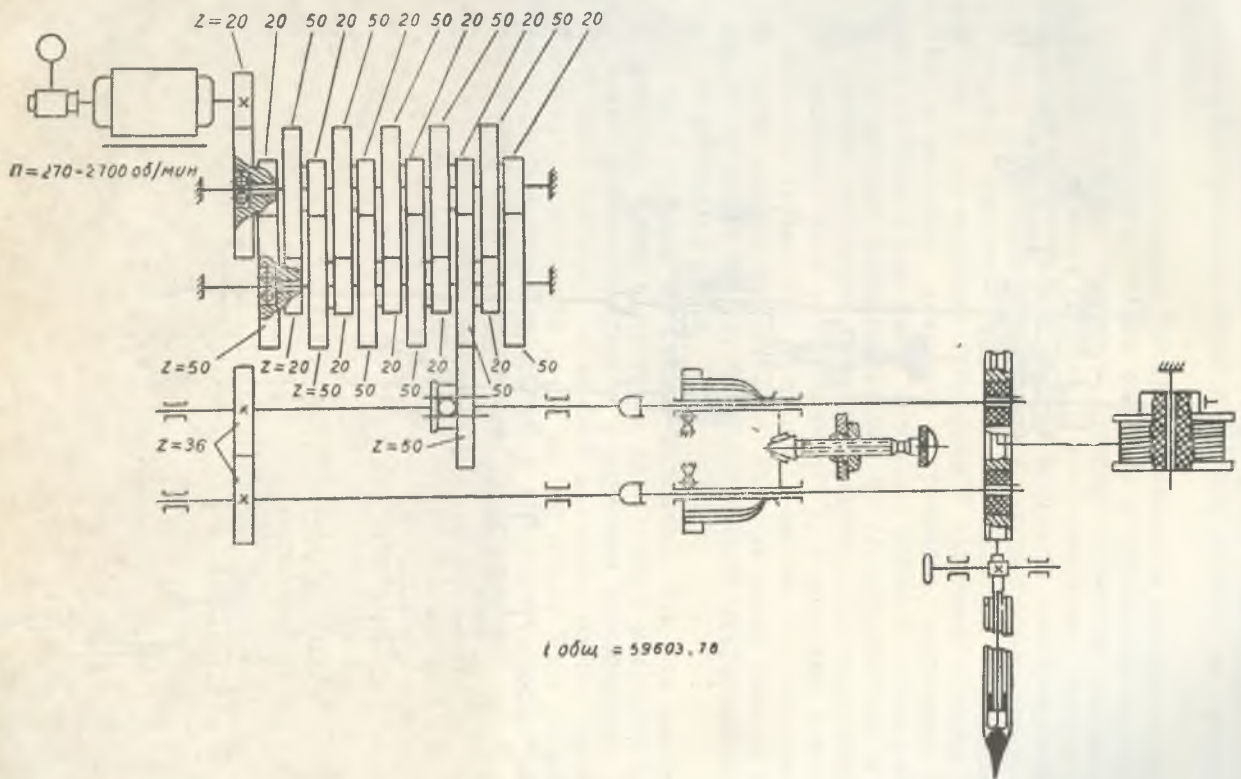


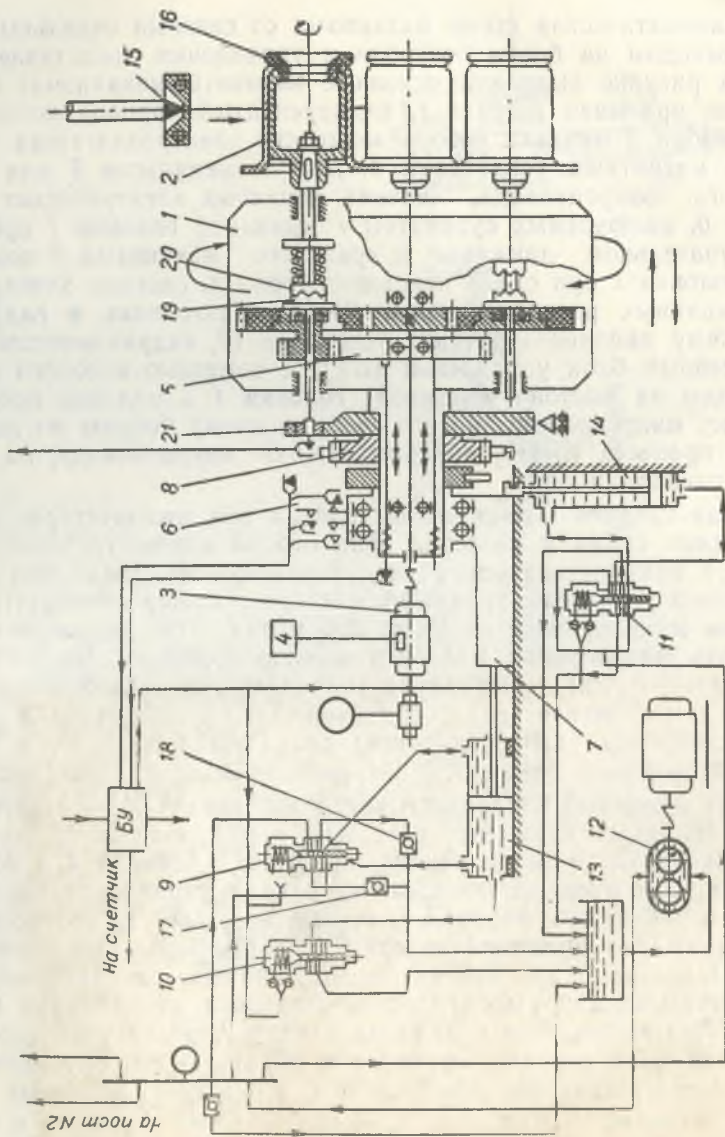
Рис. 59. Кинематическая схема механизма подачи шихтового металла установки типа АЛМ-5

в любую установку литья микропровода с включением его в систему корректировки процесса литья в режиме ручного и автоматического управления.

Гидрокинематическая схема механизма со связями отдельных элементов и выходом на блоки контроля и управления представлена на рис. 61. На рисунке выделены основные элементы механизма: многошпindelная приемная головка 1, шестеренчатый привод шпинделей приемных бобин 2 от вала отбора мощности электродвигателя 3, управляемого магнитным усилителем 4, датчик импульсов 5 для счета принимаемого микропровода, система концевых электрических переключателей 6, включаемых суппортом 7 приемной головки 1 при возвратнопоступательном движении и храпового механизма 8 поворота приемной головки 1 при смене приемных бобин 2, система электромагнитных клапанных распределителей 9—11, включенных в гидравлическую систему масляного питания установки 12, гидравлический привод 14, релейный блок управления (БУ), с помощью которого поступают команды на выстой приемной головки 1 в наладке процесса, на раскладку микропровода, на его счет, на смену бобины по сигналу индикатора процесса (БИП) об обрыве жилы микропровода, на изменение хода раскладки и т. д.

Приемная головка механизма выполнена так, что шестерни шпинделей приемных бобин и шестерня вала отбора мощности электродвигателя могут комплектоваться в следующем соотношении: при наличии магнитного усилителя приемный механизм может обеспечить скорость приема микропровода от 16 до 800 м/мин. Этот диапазон позволяет получить микропровод малого и большого сечения. Число шпинделей приемных бобин в механизме определяется технологическими требованиями и практически не ограничено, что существенно в случае приема микропровода непосредственно на катушки изделий, а также при решении вопроса бункерной загрузки приемных шпинделей.

Работает приемный механизм в установке типа АЛМ-5 следующим образом: стеклянный капилляр, стянутый с микрованны 15 на ходу шпинделя, заводится в щель между приемной бобиной 2 и бобышкой 16. При этом пусковой кнопкой на панели управления через БУ включается в работу гидропривод 7, осуществляющий возвратнопоступательное движение приемной головки 1 и раскладку микропровода на бобину. Одновременно автоматически включается запорный клапан 10, перекрывающий выход рабочей жидкости из цилиндра 13 гидропривода 7, и включается клапан раскладки 9, после чего приемная головка 1 движется вперед. Движение в обратную сторону приемная головка 1 осуществляет при обесточенном, с помощью концевых переключателей, клапане 9. Движение приемной головки 1 вперед и назад плавно регулируется в широком диапазоне скоростей перекрытием дроссельных клапанов 17, 18, регулирующих выход на слив отработанного масла.



Р и с. 61. Гидрокинематическая схема механизма приема микропровода установки типа АЛМ-5

Подобная регулировка хода приемной головки обеспечивает увеличение времени раскладки в одну сторону до 2 минут, а регулировка выстоя механизма в крайних положениях сокращается до 0,025 секунды. После заправки стеклянного капилляра — начала микропровода — на бобину и включения гидропривода раскладки оператор не вмешивается в дальнейшую работу приема микропровода. При этом намотка стеклянного капилляра на бобину происходит до тех пор, пока с микрованны не снято лишнее стекло и индикатором процесса установки не будет подан первый сигнал о появлении металла жилы микропровода в стеклянном капилляре. Если реле времени БУ, контролирующее частоту поступающих команд, в том числе и частоту обрывов жилы микропровода, не зафиксирует, что за заданное время первой технологической паузы обрыва жилы не было, БУ подает команду на ускоренный сдвиг приемной головки в исходное положение, что осуществляется путем разрыва цепи на клапан раскладки 9 и клапан 10. В момент подхода приемной головки в крайнее положение с помощью концевых выключателей 6 и БУ отработывает клапан 11 гидропривода 14, который с помощью храпового механизма плавно проворачивает приемную головку, вводя в действие новую бобину, что осуществляется при помощи кулачковых полумуфт 19, 20 и штока, расположенного внутри шпинделя приемной бобины, под действием спиральной пружины, упирающейся одним концом в сухарик кулачковой полумуфты, а другим — скользящим по специальному копиру 21. За счет системы кулачковых полумуфт 19, 20 и копира 21 с проворотом приемной головки одна из бобин в верхней части головки всегда находится в готовности для приема микропровода и вращается со скоростью бобины, принимающей микропровод, остальные бобины, находящиеся на шпинделях прекративших вращение, заменяются новыми. С вводом новой бобины микропровод засекается между бобиной и бобышкой 16, отрываясь от первой бобины также без вмешательства оператора. Одновременно с помощью реле времени БУ приемная головка выдерживается в заданной второй технологической паузе, после которой при отсутствии нарушений процесса БИП поддерживает сигнал о целостности жилы микропровода, подается команда на раскладку микропровода, одновременно БУ открывает путь импульсов на счет метража принимаемого микропровода.

Прием микропровода на бобину идет до окончания процесса. В этом случае по команде БУ приемная головка ускоренно сдвигается в исходное положение, проворачивается и вводит в действие новую бобину. Дальнейшая работа приемного механизма протекает по уже описанному циклу. Автоматический контроль хода намотки микропровода на бобину исключает появление разрывов жилы и обеспечивает намотку бобин с заданным числом витков.

Система концевых переключателей 6 приемного механизма совместно с БУ работает таким образом, что за первый ход вперед микропровод раскладывается от начала и до конца бобины, обратный же

и все последующие ходы (исключая случай обрыва процесса) приемной головки осуществляются короче первого на 5—10 мм, что обеспечивает удобство измерения параметров начала и конца микропровода.

Контроль целостности металлической жилы внутри стеклянного капилляра получаемого микропровода в установке типа АЛМ-5 осуществляется с помощью вышеупомянутого блока индикации процесса (БИП) (рис. 62), работающего по принципу передачи высокочастот-

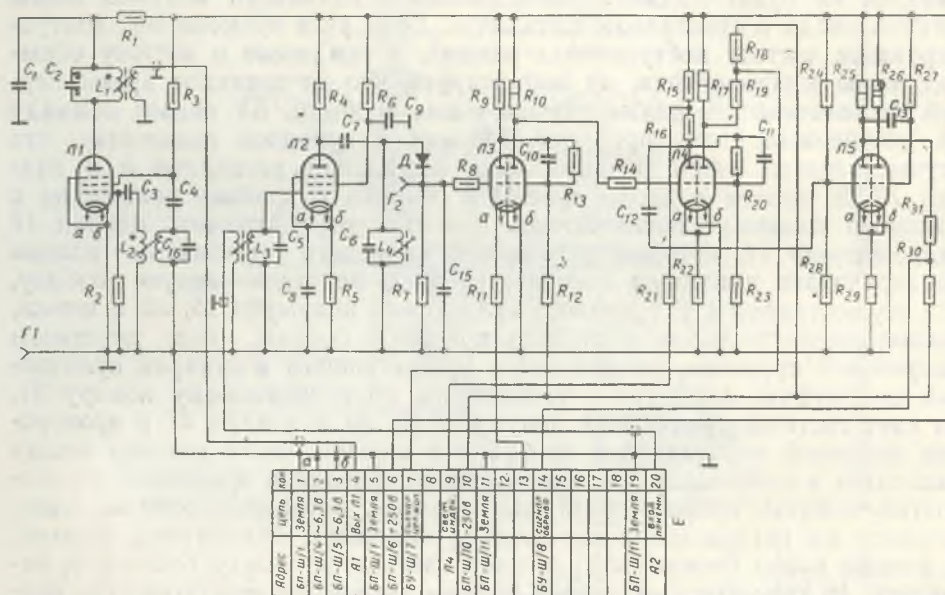


Рис. 62. Принципиальная схема блока индикации процесса литья микропровода по целостности его жилы внутри стеклянного капилляра

ной энергии по отрезку жилы микропровода, проходящему между антеннами на пути от микрованны к приемной бобине. Наряду с индикацией о целостности и разрывах жилы в установках рассматриваемого типа БИП обеспечивает управление работой приемного механизма в режиме «автомат». Наиболее целесообразной рабочей частотой для БИП принято считать 1500 кгц, расстояние между передающей и приемной антеннами 290—300 мм, напряжение на передающей антенне 100 в. При этом минимальное напряжение на нагрузке детектора БИП, необходимое для срабатывания схемы, 2 в, срабатывание схемы обеспечивается при сколь угодно малом разрыве жилы микропровода, приводящем к резкому ослаблению сигнала на входе приемной антенны. В приведенной схеме (рис. 62) предусмотрена возможность регулировки

чувствительности БИП с помощью переменного сопротивления в цепи катода первого каскада усилителя постоянного тока, регулирующего отсечку сигнала, снимаемого с детектора по минимуму. Для обеспечения темпа срабатывания БУ и системы исполнительных механизмов автоматического управления работой по приему микропровода сигналы его микроразрывов расширяются путем дифференцирования и запуска с помощью одновибратора через делитель только положительного экспоненциального импульса длительностью 500 мсек.

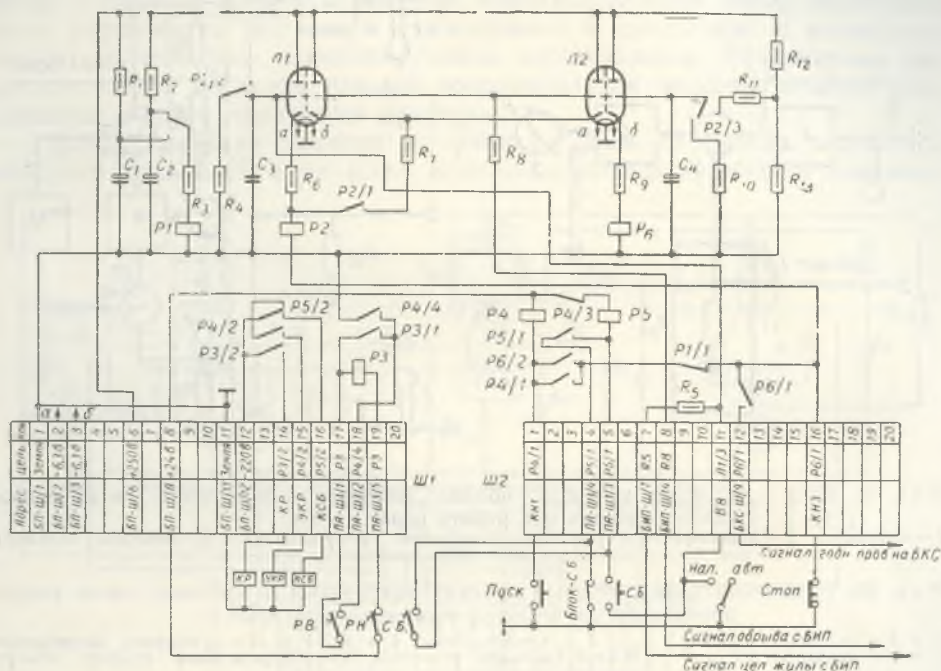


Рис. 63. Принципиальная схема блока управления установки типа АЛМ-5

Блок управления (БУ) (рис. 63) в установке АЛМ-5 предназначен для автоматического управления работами приемного механизма, учета годного микропровода и при необходимости управления фазовой подачи шихтового металла в зону индуктора. Для приемного механизма БУ осуществляет следующие команды: выдержка технологической нагрузки при наладке процесса и приеме микропровода на конце бобины без раскладки микропровода, пуск раскладки при наладке процесса, ускоренный сдвиг механизма в исходное положение и «стоп» раскладки в случае обрыва процесса, уменьшение хода раскладки на заданную величину после намотки на бобину первого слоя микропро-

вода, проворот приемной головки и ввод в действие новой обмотки при обрыве процесса, а при необходимости по достижению заданной длины микропровода или по получению сигнала об отклонениях от нормы какого-либо технологического режима или погонного сопротивления получаемого микропровода. Указанные команды могут подаваться полностью или частично в зависимости от ручного или автоматического режима управления установкой.

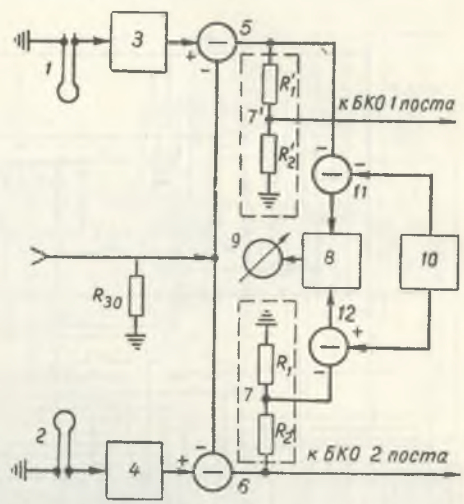
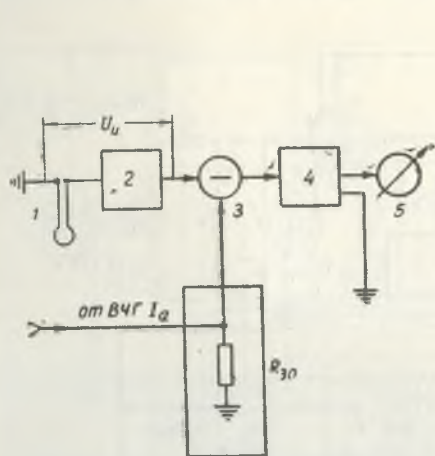


Рис. 64. Блок-схема блока контроля объема микрованны в процессе литья микропровода при работе одного поста:

1 — индуктор; 2 — детектор; 3 — сумматор напряжения; 4 — усилитель; 5 — источник компенсирующего напряжения

Рис. 65. Блок-схема блока контроля объема микрованны в процессе литья микропровода на двух постах установки типа АЛМ-5:

1 и 2 — индукторы постов 1 и 2; 3 и 4 — детекторы; 5 и 6, 11 и 12 — сумматоры напряжения; 7 и 7' — делители $\Delta U_{\text{к}}$; 8 — дифференциальный усилитель; 9 — измерительный прибор; 10 — устройство температурной компенсации

Для непрерывного контроля изменения объема микрованны в процессе литья в установке типа АЛМ-5 был использован специальный блок-контроль объема микрованны (БКО) (рис. 64) [30]. Указанный блок — это практически безынерционный датчик расхода металла микрованны до заданного уровня и его восстановления при полном обрыве жилы микропровода. При работе установки БКО обеспечивает непрерывную световую сигнализацию об уменьшении объема микрованны, косвенный контроль и поддержание в заданном интервале температурного режима хода технологического процесса литья микропровода. Приведенная погрешность выполнения заданного объема микрованны в пределах 3%, чувствительность схемы 0,1 мка/мг. Принцип

действия БКО состоит в измерении приращения напряжения на зажимах индуктора при изменении в нем объема металла микрованны. Установлено, что при постоянных значениях анодного тока, выбранном шихтовом металле, при заданном индукторе и заданной стеклянной трубке, при постоянной скорости подачи стекла и скорости приема микропровода напряжение на зажимах индуктора — однозначная функция объема микрованны. При введении в индуктор навески металла падение напряжения на индукторе изменяется не более чем на десятые доли процента. Для измерения стабильных отклонений напряжения на входе усилителя БКО используется компенсационный метод токов. При этом напряжение индуктора суммируется в сумматоре с последовательно включенным компенсирующим напряжением. Приращение напряжения при введении каждой дополнительной навески металла усиливается и затем измеряется прибором.

Для устранения влияния на работу схемы случайных колебаний анодного тока ВЧГ в качестве источника компенсирующего напряже-

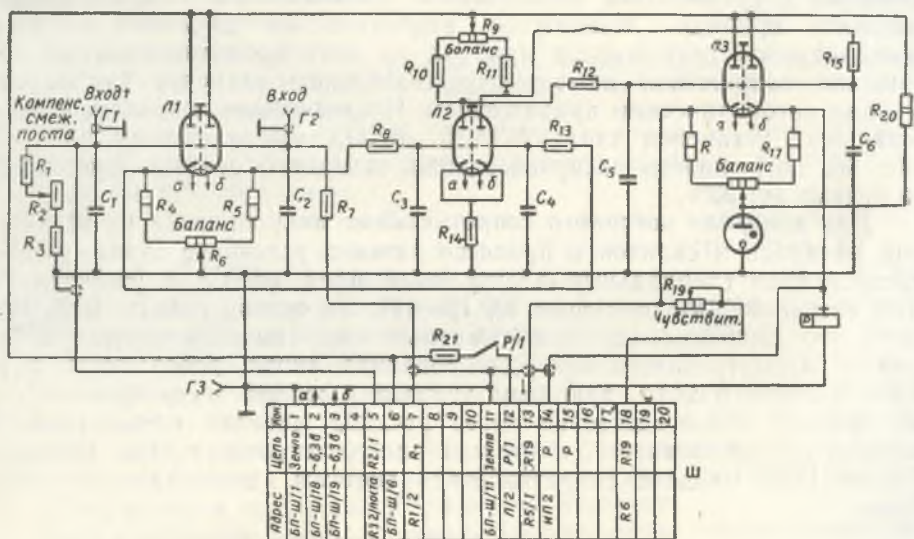


Рис. 66. Принципиальная схема блока контроля объема микрованны

ния используется сопротивление, включенное в цепь анодного тока генератора. При этом схема настраивается так, чтобы при колебаниях анодного тока показания прибора оставались неизменными.

Учитывая, что при работе двухпостовых установок с общим колебательным контуром загрузка одного из индукторов приводит к некоторому, практически неизбежному, изменению напряжения на втором индукторе, схема БКО (рис. 64) может удовлетворительно работать при условии эксплуатации лишь одного поста установки.

Для устранения взаимного влияния постов на результаты измерений рекомендуется схема компенсации (рис. 65). С использованием этой схемы при загрузке индуктора I на выход дифференциального усилителя поступает приращение Δu , а на вход — $k^2\Delta u$. Показания измерительного прибора пропорциональны разности сигналов на входах ДУ $\Delta = \Delta u(1 - k^2)$.

С использованием приведенной схемы чувствительность прибора снижается в $(1 - k^2)$ раз. Так, при $k = 0,5$ чувствительность уменьшается на 29%, однако снижение чувствительности легко компенсируется повышением коэффициента усиления ДУ. Влияние колебаний анодного тока в данной схеме устраняется так же, как было описано выше. Для устранения температурной погрешности прибора используется схема температурной компенсации, которая подключается к входам дифференциального усилителя через сумматоры. Цель термокомпенсации рассчитывается так, чтобы приращение напряжения на термочувствительном элементе, суммируясь с приведенной по входу температурной погрешностью, обеспечивало постоянство показаний измерительного прибора. Возможное возникновение обратной по знаку температурной погрешности прибора за счет продолжающегося приращения напряжения на термочувствительном элементе учитывается в схеме автоматическим приращением. Исследования показали, что при оснащении установок типа АЛМ-5 БКО, выполненными по схеме рис. 66, погрешность воспроизведения заданного объема микрованны не превышает 20%.

Для контроля погонного сопротивления микропровода из резистивных металлов и сплавов в процессе литья в установке типа АЛМ-5 предусмотрен специальный электронный блок (БКС) с регистрирующим самопишущим прибором [9, 13—18]. За основу работы БКС принято, что микропровод, наматываемый на металлическую бобину, может рассматриваться как однопроводная линия, работающая в режиме холостого хода, при этом контакт с жилой микропровода осуществляется непосредственно через расплав металла микрованны, из которой он вытягивается, а вторым проводом служит сама приемная бобина [31]. Входное сопротивление системы микропровод—бобина будет

$$Z = \sqrt{\frac{r}{\omega c}},$$

где r — усредненное погонное сопротивление микропровода, ом/м; c — усредненная погонная емкость микропровода относительно поверхности бобины, пф/м; ω — рабочая частота, 1/сек. Конструктивно БКС может быть выполнен согласно рис. 67 и 68, на которых показано, что RC — генератор 28 кгц и усилитель напряжения питают измерительный мост, работающий в небалансном режиме. Для установки измерительного прибора в начале его работы на бесконечность предусмат-

ривается возможность регулировки напряжения на выходе усилителя в нужном пределе. Отмеченный в схеме катодный повторитель обеспечивает прием сигнала моста и в результате низкого собственного выходного сопротивления позволяет включение в схему самопишущего измерительного прибора.

Измерительный мост БКС выполняется по схеме с детектированным сигналом в двух плечах. При этом элементы моста подбираются из расчета максимальной чувствительности схемы при минимальном числе коммутаций. Величина разбаланса моста соответствует величине измеряемого погонного сопротивления микропровода. Изменение пределов моста достигается подключением (рис. 67) сопротивлений соответствующих номиналов, что обеспечивает возможность, с использованием соответствующих шкал, контроля за микропроводом в широких пределах погонного сопротивления: 2,9—400 ком/м.

Для нормальной работы БКС контакт схемы с микрованной осуществляется с помощью специального контактного устройства, на конце которого закреплен тугоплавкий проводник диаметром 0,2 ÷ 0,3 мм, вводимый в микрованну на глубину 0,5 ÷ 1,5 мм. Подбор контактного материала связан с определенными трудностями и зависит от свойств пары. Так при литье манганинового микропровода для контакта с микрованной используется рений или вольфрам, а при литье медного микропровода — «контал» (22% Al, 20% Cr, остальное Fe). В ряде случаев при литье микропровода на основе хромоникелевых и других сплавов для контакта с микрованной используются керметы или тонкая вольфрамовая проволока в кварцевой оболочке.

Для повышения точности измерения погонного сопротивления микропровода с помощью рассмотренного выше блока используемые bobины рекомендуются покрывать слоем диэлектрика [32]. В подобном случае

$$Z = \sqrt{\frac{2HR}{\omega N \ln \frac{R}{\pi}}}$$

где H — расстояние между металлической поверхностью bobины и микропроводом, N — постоянный коэффициент, зависящий от диэлектри-

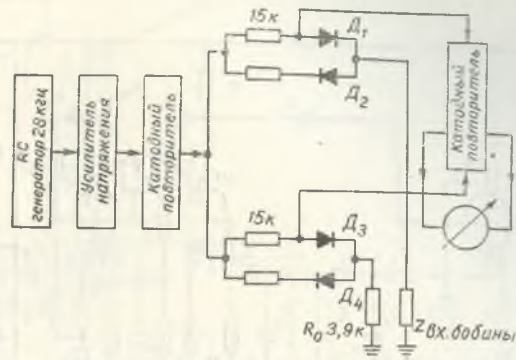


Рис. 67. Блок—схема контроля погонного сопротивления микропровода в процессе литья

ческой проницаемости покрытия бобин. При условии практически допустимых изменений удельного сопротивления жилы микропровода $\pm 20\%$ и $H \pm 0,1$ мм и толщине покрытия бобины в 1 мм погрешность измерения z уменьшится до $3 \div 5\%$. При работе БКС следует учиты-

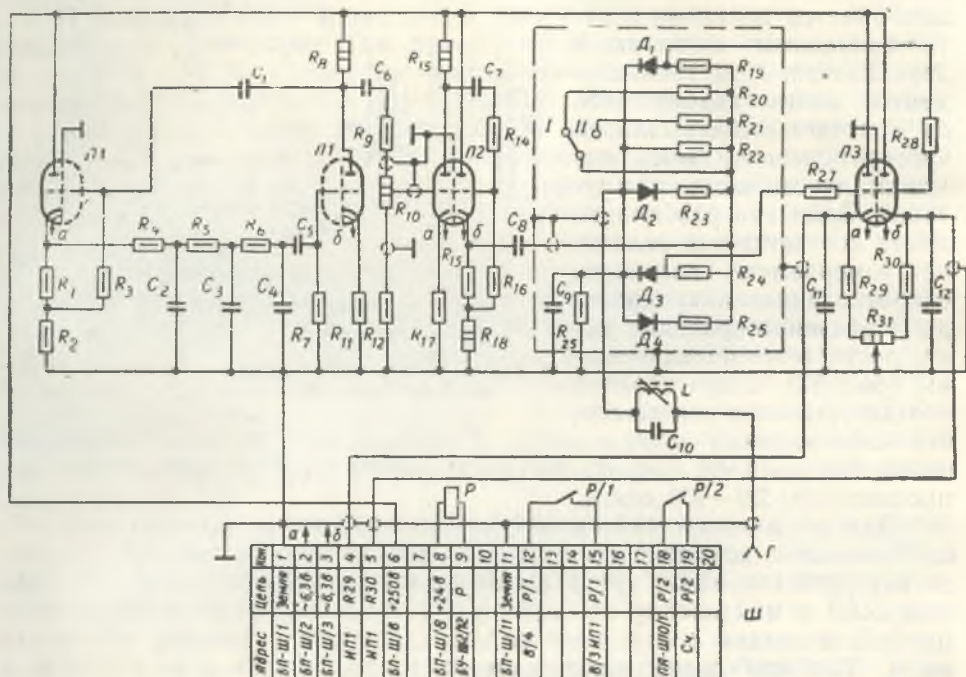


Рис. 68. Принципиальная схема блока контроля погонного сопротивления микропровода установки типа АЛМ-5

вать, что величина «длинной линии» для измеряемого микропровода находится в обратной зависимости от его удельного сопротивления и, в частности, для марганцевого микропровода составляет 5—10 м, а для медного — увеличивается до 30 м.

Кроме указанных механизмов, блоков контроля и управления в установке типа АЛМ-5, как и в УМ-1, используется стабилизатор анодного напряжения САН-57 [20]. В установке он предназначен для стабилизации действующего или среднего значения анодного напряжения питающего ВЧГ, при изменениях нагрузки и колебаниях напряжения питающей сети, а также для плавного регулирования анодного напряжения. Указанный стабилизатор может быть использован в работе с любым ламповым генератором, имеющим выпрямитель на тиратро-

нах и питающийся от трехфазной сети. При колебаниях напряжения питающей сети в пределах 15% САН-57 обеспечивает стабилизацию выпрямленного (анодного) напряжения как по среднему, так и по

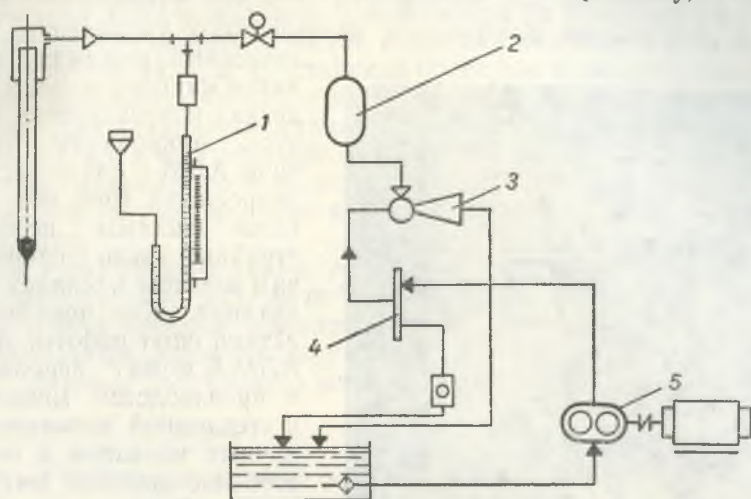


Рис. 69. Схема устройства системы разрежения рабочего поста установки типа АЛМ-5:

1 — микровакуумметр с передвижной шкалой; 2 — ресивер; 3 — струйный насос; 4 — распределительная гребенка; 5 — шестеренчатый масляный насос

действующему значению, что составляет $\pm 1,5\%$ от номинального напряжения неуправляемого выпрямителя. Стабилизатор действует не только при симметричном изменении напряжения на всех трех фазах питающей сети, но и при любых перекосах фаз. Нестабильность анодного напряжения при постоянном напряжении сети и изменении нагрузки ВЧГ от холостого хода до номинального составляет $\pm 1\%$. Пределы плавного регулиро-

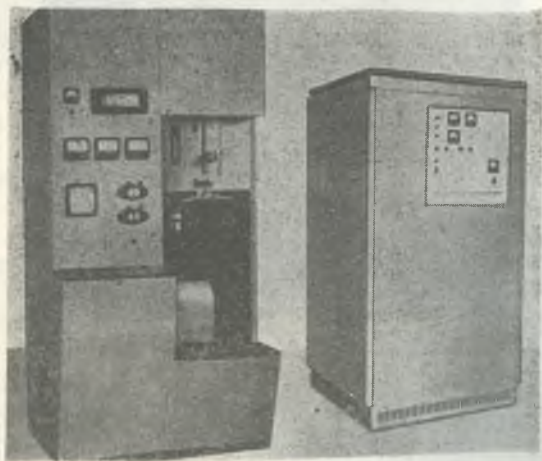


Рис. 70. Установка типа УЛП-6 для литья микропровода в стеклянной изоляции в составе одного ВЧГ и двух рабочих постов

вания анодного напряжения с помощью стабилизатора при номинальном напряжении сети от 65 до 100% номинального значения напряже-

ния неуправляемого выпрямителя. Действие стабилизатора основано на автоматическом регулировании углов зажигания тиратронов управляемого выпрямителя при колебаниях сети или изменениях нагрузки.

Для обеспечения отдельного независимого управления технологическими режимами процесса литья микропровода, в том числе для корректировки температуры микрованны, установка типа АЛМ-5 содержит систему разрежения (рис. 69). Для работы системы используется струйный насос с единым рабочим агентом масляной системы питания. Как показал многолетний опыт работы, установка АЛМ-5 может использоваться в производстве микропровода в стеклянной изоляции из различных металлов и сплавов и особенно медного микропровода d до 25 мкм.

Кроме установки АЛМ-5 (в двухпостовом варианте), известна установка типа УЛП-6 (рис. 70). Она состоит из специально разработанного ВЧГ с рабочей частотой $880 \text{ кгц} \pm 1\%$. Деление выходной мощности генератора между рабочими постами осуществлено параллельным подключением двух идентичных колебательных контуров к общему выходу генераторной лампы. Взаимное влияние контуров в процессе литья разработчики установки рассчитывали исключить, применив систему автоматической стабилизации напряжения на контурах. Для выбора необхо-

димых режимов работы напряжение на колебательных контурах предполагалось регулировать в пределах 30—100% от номинального значения. Введение в установку фильтрации анодного напряжения лампы генератора и стабилизации напряжения накала генераторной лампы и тира-

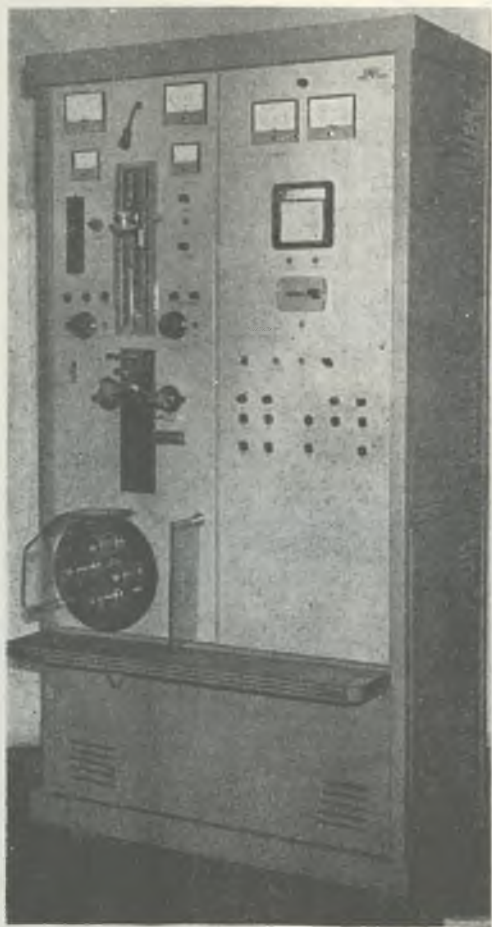


Рис. 71. Установка типа АЛМ-5—1 для литья микропровода в стеклянной изоляции

тронов с погрешностью до $\pm 1\%$ должно было резко улучшить форму выходного напряжения генератора и стабилизировать режимы его работы. Однако тщательные испытания нескольких комплектов опытных образцов установок типа УЛП-6 показали, что, несмотря на принятые разработчиками меры, работа одного из постов установки неизбежно отражается на работе другого поста: к. п. д. установки более чем в два раза ниже к. п. д. установок, используемых на кишиневском заводе «Микропровод»; что исполнительные механизмы установок излишне усложнены и ненадежны в эксплуатации и в фактическом исполнении лишены средств контроля температуры микрованны и R_n получаемого микропровода. В силу этих причин УЛП-6 не нашли применения в промышленном производстве микропровода.

Более совершенным типом установки литья микропровода можно считать АЛМ5-1 (рис. 71). В ней впервые использованы новые технические и конструктивные решения, такие, например, как специальный высокостабильный источник высокочастотной энергии, способ бесконтактного контроля получаемого микропровода и т. д.

§ 2. Технологические режимы литья микропровода

Вопросы, связанные с исследованием технологических зависимостей и разработкой технологических режимов литья микропровода, нашли отражение в работах [33—56], в некоторых из них были рассмотрены особенности лабораторного и промышленного производства литого микропровода из резистивных и проводниковых металлов и сплавов и полупроводников.

В настоящее время широкое промышленное применение нашел микропровод из сплавов сопротивления, литье которого осуществляется капельным способом. Сплавы сопротивления, применяемые для литья микропровода, можно разделить на две группы — фильерные и литьевые. К первым следует отнести сплавы, разработанные для фильерного способа производства, — это манганин, Н60ГХ, Н63ГХ. К сплавам литьевым, т. е. разработанным для литья микропровода, можно причислить сплавы типа манганин с добавками Fe, V, сплавы на никелевой основе и другие. Если микропровода из фильерных сплавов уже применяются в промышленности, то микропровода из литьевых сплавов еще находятся в стадии внедрения.

У каждого сплава свои особенности технологического режима литья, зависящие от физико-химических свойств пары металл—стекло. Однако в целом технологический режим литья характеризуется рядом факторов, совокупным влиянием которых определяются параметры микропровода.

На диаграмме (рис. 72) приведены факторы, влияющие на основные параметры микропровода, в том числе на его погонное сопротивление

ние. По значимости их можно разделить на перворазрядные, второразрядные и третьеразрядные. Такое деление позволяет из всей гаммы факторов выделить наиболее важные, так как второразрядные и третьеразрядные носят соподчиненный характер и влияют на погонное сопротивление.

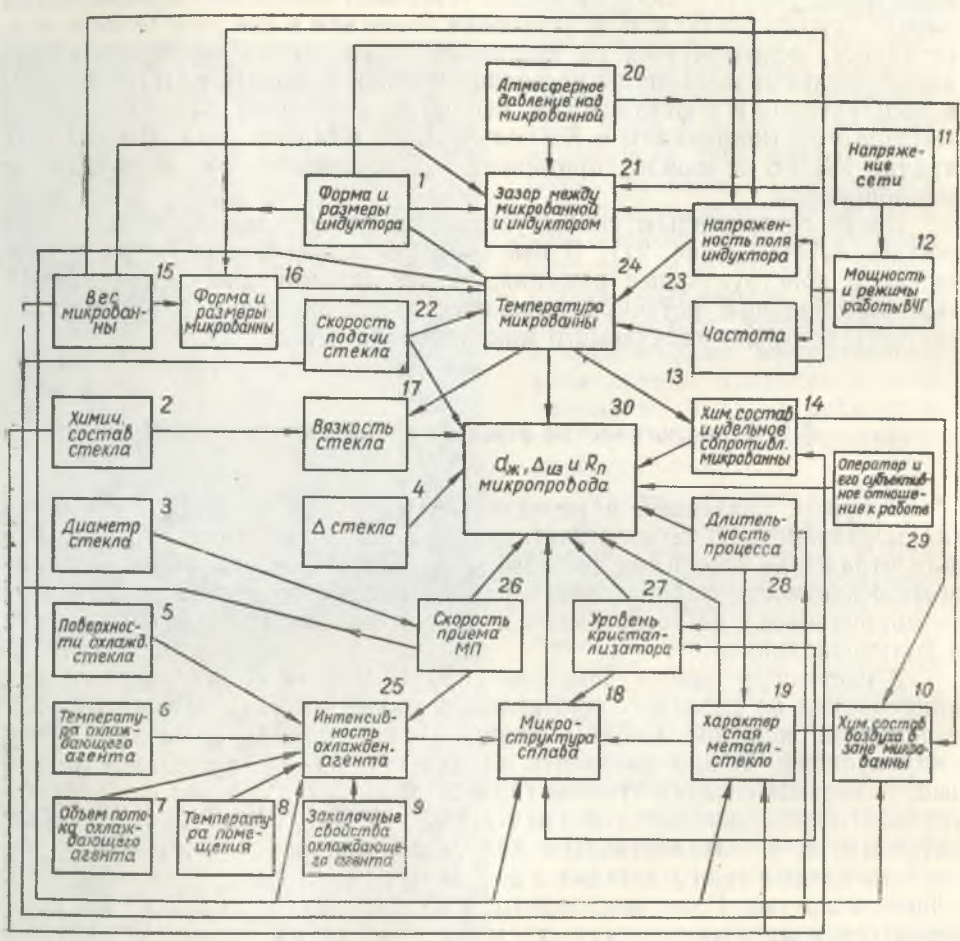


Рис. 72. Диаграмма факторов технологического процесса, влияющих на основные параметры микропровода

тивление через перворазрядные. Таким образом, ответственными за погонное сопротивление являются следующие перворазрядные факторы: температура микрованны, ее форма, скорость литья, длина зоны растягивания и удельное сопротивление используемого сплава. Остановимся на каждом в отдельности.

Температурный режим литья характеризуется температурой начала и конца процесса. В указанном интервале температур происходит формирование стеклянного капилляра и его заполнение жидким сплавом. Каждая пара металл—стекло характеризуется своим температурным интервалом литья. Так, для манганина он находится в пределах 1180—1280°C, для Н60ГХ и Н63ГХ—1260—1330°C, а литье микропровода из литевского сплава на никелевой основе протекает при температуре 1320—1380°C.

Следует отметить, что литье микропровода осуществляется при перегреве сплава на 50—250°C. Величина перегрева определяется литейными свойствами сплава, которые, как известно, улучшаются с повышением температуры. На температуру сплава в микрованне влияют второразрядные факторы: режим генератора, вес сплава, давление над микрованной, конфигурация магнитного поля. Характерным для капельного способа является изменение в процессе литья веса микрованны, что приводит к изменению ее температуры.

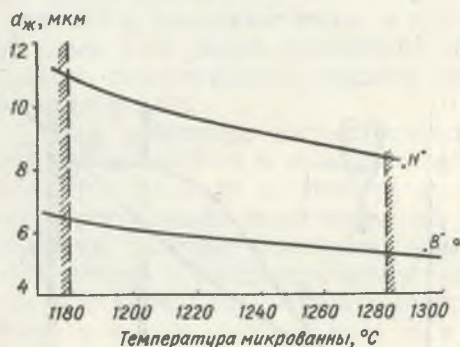


Рис. 73. Влияние температуры микрованны на диаметр жилы манганинового микропровода

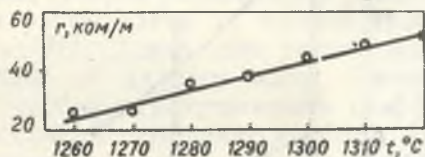


Рис. 74. Влияние температуры микрованны на погонное сопротивление микропровода из сплава Н60ГХ (средние данные 200 измерений; технологический режим литья и исходные материалы заданы)

На рис. 73 представлена зависимость диаметра жилы манганинового микропровода от температуры. Из графика следует, что с уменьшением температуры сплава в микрованне диаметр жилы микропровода увеличивается. Степень влияния температуры на диаметр жилы практически не зависит от применяемого при литье стекла. Действительно, для двух различных стекол, условно обозначенных «В» и «Н», в рассматриваемом температурном диапазоне влияние температуры на диаметр микропровода одинаково.

Указанные на рис. 73 границы температурного режима определяют минимально допустимой температурой процесса, которая в свою

очередь определяется вязкостными свойствами стекла и литейными свойствами сплава. Максимально допустимая температура процесса литья лимитируется только свойствами стекла. Превышение ее приводит к прободению стеклянной оболочки микрованны и нарушению процесса литья.

В процессе литья температура микрованны изменяется, что влияет на погонное сопротивление микропровода (рис. 74). Однако следует отметить, что зависимость диаметра микропровода и погонного сопротивления не всегда носит линейный характер. В [39] установлено, что если повышение температуры микрованны достигается за счет увеличения ее массы, то зависимость $R_{п.}$ от температуры принимает вид кривой с экстремумом, начиная с какой-то массы с ростом температуры $R_{п.}$ начинает убывать.

На температуру начала процесса литья заметное влияние оказывает также время томления металла в микрованне. При достаточно долгой выдержке создаются предпосылки для получения микропровода с диаметром жилы менее 1 мкм ($R_{п.} = 150 \div 1000$ ком/м).

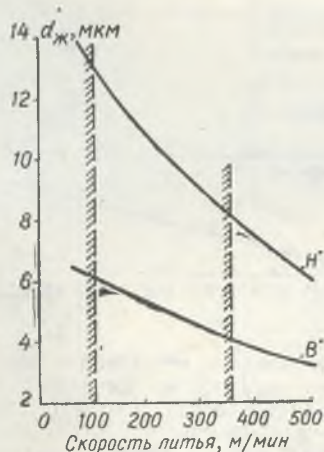


Рис. 75. Влияние скорости литья на диаметр жилы марганцевого микропровода

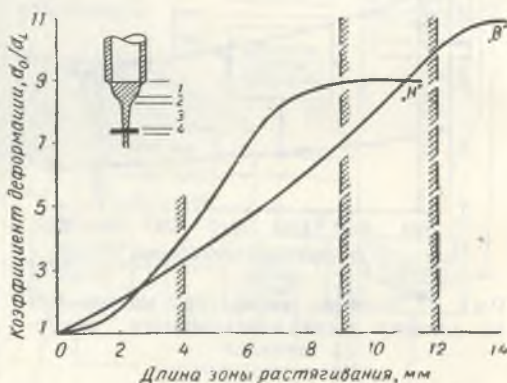


Рис. 76. Влияние длины зоны растягивания на диаметр жилы марганцевого микропровода:

1 — первичные и 2 — вторичный конусы растягивания; 3 — зона растягивания; 4 — кристаллизационные жидкости

Если температурный режим литья обеспечивает возможность образования стеклянного капилляра и заполнение его жидким сплавом, то само формирование микропровода происходит под действием растягивающих усилий, которые затрачиваются на преодоление вязких сил и поверхностного натяжения системы металл—стекло, а также на сообщение частицам этой системы некоторого ускорения. Величина форми-

рующей силы в основном определяется натяжением в микропроводе, зависящим от скорости литья, под которой понимается скорость движения микропровода при выходе из нижней границы струи кристаллизационной жидкости.

Влияние скорости литья на диаметр жилы показано на рис. 75, из которого следует, что с увеличением скорости литья диаметр жилы манганинового микропровода уменьшается. При этом наиболее сильно скорость литья сказывается на диаметре микропровода при литье с использованием стекла типа «Н».

Минимальной скоростью литья микропровода, учитывая экономические показатели капельного слособа, следует считать 100 м/мин. Экспериментально установлено что максимальная скорость литья микропровода также ограничена. Так, например, при литье манганинового микропровода скорость не должна превышать 350 м/мин. Это связано с тем, что с увеличением скорости литья растет натяжение в микропроводе, в результате чего стеклянная изоляция и жила испытывают определенные напряжения, которые при скорости литья более 350 м/мин приводят к разрывам жилы, а при скорости более 500 м/мин к частым обрывам уже самой стеклянной оболочки микропровода. Для других сплавов сопротивления пределы скорости литья несколько отличаются от приведенных.

Под действием рассмотренных растягивающих усилий микропровод деформируется в зоне растягивания, которая определяется расстоянием от основания вторичного конуса растягивания до верхней границы кристаллизационной жидкости (рис. 76). Длина зоны растягивания является третьим фактором, влияющим на диаметр жилы. Степень деформации в рассматриваемой зоне удобно характеризовать коэффициентом деформации k , который представляет отношение диаметра вторичного конуса растягивания d_0 к диаметру жилы в рассматриваемой точке зоны растягивания d_h . Коэффициент деформации зависит от длины зоны растягивания (рис. 76). Следует отметить, что стекло «В» обладает большей способностью растягиваться. Различная способность к деформации связана, по-видимому, с коэффициентом нарастания вязкости, который у стекла «В» меньше чем у «Н».

Регулирование степени деформации изменением длины зоны растягивания возможно в определенных пределах. Минимальная длина определяется допустимым расстоянием между индуктором и струей кристаллизационной жидкости. Максимальная длина устанавливается из следующих соображений. Охлаждение микропровода в зоне растягивания должно происходить таким образом, чтобы фиксировался заданный размер жилы и исключались ее разрывы. В связи с этим максимальная длина зоны растягивания при литье манганинового микропровода обычно не превышает 9—10 мм для стекла «Н» и 12—13 мм для стекла типа «В». Практически длина зоны растягивания несколько меньше указанной. Для других сплавов сопротивления допустимая длина зоны растягивания отличается от указанной.

Рассматривая зону растягивания, следует назвать ряд факторов, связанных с ней, учитывая которые необходимо при выборе ее длины. К ним относится температурный интервал кристаллизации сплава, температура начала размягчения стекла, закалочная способность кристаллизационной жидкости и др. Здесь же необходимо упомянуть о возможности регулирования коэффициента деформации не путем изменения длины зоны растягивания, а интенсивным охлаждением вторичного конуса растягивания путем принудительного обдува его воздухом. Следующий ответственный за диаметр жилы фактор — форма микрованны (часть стеклянной трубки, соприкасающаяся с жидким металлом), которую условно можно разделить на две части — первичный и вторичный конусы (рис. 76). Внутренний диаметр основания вторичного конуса в первую очередь зависит от вязкости стекла. При вязкости стекла 1000—2000 пз диаметр вторичного конуса составляет 30—40 мк (стекло «В»), при вязкости 2000—3000 пз — 70—80 мк (стекло «Н»). Таким образом, форма микрованны, которая при прочих равных условиях зависит от вязкости стекла, практически предопределяет возможность формирования микропровода необходимого диаметра. Действительно, стекло типа «В» позволяет изготавливать микропровода с диаметром жилы в несколько раз меньше, чем с использованием стекла «Н». О влиянии вязкости стекла на диаметр формируемого микропровода указывается в [43, 57].

Кроме вязкости стекла на форму микрованны влияет давление над ней, конфигурация магнитного поля, скорость подачи трубки, скорость литья, температура микрованны. В [39] показано, что заметно влияет на параметры микропровода изменение электрических режимов литейной установки. В частности, для манганинового микропровода погонное сопротивление находится в линейной зависимости от анодного тока установки I_a . Зависимость удовлетворительно описывается уравнением линейного типа и в конкретных условиях для диапазона I_a от 1,5 до 2,2 а (при неизменных остальных условиях литья) принимает вид

$$R_n = 12,9 + 13,3(I_a - 1,83).$$

Исходя из предположений, что на параметры микропровода в первую очередь оказывают влияние температура и форма микрованны, были предприняты попытки выбора и методов изменения названных условий непосредственно в ходе литья микропровода. Варьирование электрических режимов установок, как возможный канал для изменения температуры и формы микрованны, не рассматривалось, так как в случае двухпостовых установок для литья микропровода он может изменяться только при задании начальных условий и должен оставаться неизменным в процессе литья.

В качестве возможных каналов для влияния на температуру и форму микрованны может рассматриваться способ ее охлаждения за счет отсоса воздуха из зоны индуктора или способ изменения ее температуры и формы за счет создания разрежения или избыточного давле-

ния внутри стеклянной трубки. Влияние интенсивности отсоса на диаметр микропровода носит характер пропорциональной зависимости.

Производительность процесса литья и качество получаемого микропровода при прочих равных условиях тесно связаны с выбором оптимального соотношения размеров плавильного индуктора и используемых стеклотрубок.

Как показано в [40], толщина стенки трубки для принятого типа индуктора принципиально не влияет на погонное сопротивление микропровода, хотя для трубок с наружным диаметром в 12 мм наблюдается тенденция к уменьшению погонного сопротивления с увеличением толщины стен трубки. Отметим, что степень взаимосвязи размеров трубки и индуктора сказывается на общем сопротивлении микропровода на одной бобине и на общем сопротивлении микропровода, изготовленного из одной трубки. Можно также заключить, что процесс литья на индукторе $\alpha=70^\circ$ наиболее устойчиво протекает при использовании трубок с наружным диаметром 9 мм, а при $\alpha=80^\circ$ — диаметром 10 мм и при $\alpha=90^\circ$ — диаметром 12 мм. Отметим, что на общее сопротивление толщина трубки не влияет. Таким образом, на общее сопротивление микропровода на бобине влияет степень согласования угла раскрытия конуса индуктора и наружного диаметра трубки. Как показали исследования, проведенные с более строгой фиксацией всех условий литья, а особенно веса металла, вводимого в микрованну, с уменьшением угла раскрытия конуса индуктора погонное сопротивление микропровода возрастает, это становится понятным, если учесть, что с уменьшением угла индуктора температура микрованны возрастает.

Результаты исследования, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что производительность при литье микропровода, кроме упомянутого согласования, зависит также от толщины стенки применяемой трубки. Действительно, для указанных выше геометрических параметров индукторов и трубок максимальная производительность была достигнута при толщине стенки в 1 мм. Следовательно, для повышения

Таблица 1

Производительность при литье микропровода в зависимости от степени согласования геометрических параметров индуктор — трубка

Угол раствора индуктора, град	Средняя производительность, Мом	
	Трубки рекомендуемые	Трубки нерелекомендуемые
70	285	210
80	350	200
90	275	160

устойчивости процесса литья и увеличения производительности необходимо согласовывать угол раскрытия индуктора с наружным диаметром трубки, а для рассмотренных пар трубка—индуктор применять трубку с толщиной стенки 1 мм. Но технология производства трубок не позволяет изготавливать их строго определенных размеров. В связи с этим

при промышленном производстве манганинового микропровода необходимо расширить допуски на толщину стенки в пределах 0,9—1,1 мм.

Отметим, что для всех рекомендуемых пар индуктор—трубка производительность с одной трубки в среднем одинакова и находится в пределах 280—350 Мом. О целесообразности согласования геометрических параметров пары индуктор—трубка говорят данные, приведенные в табл. 1.

Заканчивая рассмотрение результатов исследования, следует остановиться на вопросе о путях практического использования полученных данных. Для реализации их можно указать два направления. Первое — пересмотр технических условий на трубку с целью сужения допусков на геометрические размеры трубок. Второе — проведение калибровки стеклянных трубок по группам в зависимости от геометрических размеров до поступления их в цех литья микропровода. Литье (на каждой установке) должно осуществляться из трубок, геометрические размеры которых удовлетворяют требованию согласованности параметров пары индуктор—трубка. Это позволит повысить производительность труда при литье манганинового микропровода на 30—50%. Зависимость температуры микрованны и погонного сопротивления от формы индуктора (при постоянной массе сплава в капле) позволяет предполагать, что обнаруженные закономерности не ограничивают сферу своего влияния только манганином, но распространяются и на случаи литья микропроводов из других сплавов.

Перейдем к вопросу о зависимости толщины стеклянной изоляции от условий литья. Практика получения микропроводов в стеклянной изоляции показала, что толщина изоляции колеблется от 1—2 до 10—15 мкм на сторону (для проводов с диаметром жилы менее 20 мкм) и, очевидно, зависит от условий литья. Известно [36], что, например, скорость литья микропровода оказывает заметное влияние на толщину стеклянной изоляции. Приводимые ниже результаты получены при исследовании процесса литья манганинового микропровода со стеклом № 17 типа «Нонекс» (С39-1).

Оказалось, что на толщину стеклянной изоляции существенное влияние оказывает скорость подачи стеклянной трубки $v_{\text{п}}$ в зону капли в процессе литья. Полученная зависимость носит линейный характер и удовлетворительно описывается линейным корреляционным уравнением вида

$$y = \bar{y} + b_{y/x} \cdot (x - \bar{x}),$$

где y и x — математические ожидания соответствующих величин, $b_{y/x}$ — коэффициент регрессии. В общем случае коэффициенты y , очевидно, зависят от выбранных условий литья (кроме скорости подачи стеклянной трубки), например, от скорости литья микропровода, геометрических размеров стеклянной трубки и т. п. Коэффициенты x зависят от выбранного диапазона скоростей $v_{\text{п}}$. И в конкретном случае при литье микропровода с применением стеклянных трубок наружного диаметра

10,5 мм и толщиной стенки 1,0 мм в диапазоне скоростей $v_{\text{п}}=0,9 \div \div 2,1$ мм корреляционное уравнение принимает вид: $\Delta_{\text{из}} = 5,6 + 1,4 (v_{\text{п}} - 1,5)$ и характеризуется коэффициентом корреляции $k=0,7$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma = \pm 1,7$ мкм.

Линейный характер зависимости понятен, так как трудно предположить, что процесс литья может протекать в условиях несоблюдения материального баланса.

Низкое значение коэффициента корреляции (0,7) полученной зависимости, очевидно, обусловлено случайными возмущениями условий литья и в первую очередь колебаниями толщины стенок стеклянных трубок, которые в свою очередь вызывают значительные колебания количества стекла, подаваемого за единицу времени в зону микрованны.

Сравнивая экспериментальные данные с расчетными (зависимость толщины стеклянной изоляции от скорости подачи стеклянных трубок), наблюдаем довольно хорошее совпадение результатов в интервале скоростей подачи 0,9—2,1 мм/мин. Процесс литья микропровода не накладывает особых ограничений на верхний предел скорости подачи стеклянной трубки, и здесь мы произвольно ограничились скоростью 2,1 мм/мин. Зато к нижнему пределу скорости подачи стеклянной трубки предъявляется важное требование — при минимальной скорости не должна нарушаться целостность стеклянной оболочки микрованны, так как это всегда приводит к нарушению процесса. Очевидно, нижний предел $v_{\text{п}}$ обуславливается физическими свойствами стекла и в первую очередь его вязкостью. В нашем случае литье микропровода на скоростях $v_{\text{п}} < 0,9$ мм/мин было очень затруднено частыми «прободениями» стеклянной оболочки микрованны. Это накладывает определенное ограничение на возможность получения микропровода с тонкой изоляцией. Расчеты показали, что эти возможности тем меньше, чем меньше диаметр жилы получаемого микропровода. Так, при диаметре жилы $d_{\text{ж}} = 8$ мкм для получения изоляции толщиной в $\Delta_{\text{из}} = 2$ мкм необходимо вести литье микропровода на скоростях подачи $v_{\text{п}} = 0,44$ мм/мин, при $d_{\text{ж}} = 1$ мкм для получения $\Delta_{\text{из}} = 2$ мкм скорость подачи трубки должна быть $v_{\text{п}} = 0,17$ мм/мин (расчеты приведены для названных параметров стеклянных трубок и скорости литья микропровода, равной 200 м/мин). Однако, как уже отмечалось, эти скорости подачи недостижимы при имеющемся стекле.

Необходимость вести процесс литья при более высоких температурах для получения микропровода с малым диаметром жилы приводит к дополнительным ограничениям возможностью получения при этом тонкой изоляции, так как с ростом температуры толщина стеклянной изоляции возрастает. По аналогии с процессом вытяжки стекловолокна [58] такой характер зависимости, очевидно, можно объяснить уменьшением вязкости и ростом текучести стекла с повышением температуры. Характерно, что с увеличением температуры от 1210 до 1270°С нижний предел скорости подачи, при котором удавалось наладить про-

Таблица 2

Технологический режим литья микропровода из сплавов Н60ГХ и Н63ГХ

Технологические параметры	Значения технологических параметров	
Наружный диаметр трубки, мм	7—10;	
Толщина стенки трубки, мм	1,0—1,4;	
Индуктор {	D_1 , мм	20—24;
	d , мм	6—8;
	H , мм	8—12;
Режим генератора {	Накал, в	10—11;
	Анод, а	0,8—1,3;
	Сетка, а	0,15—0,3;
Температура процесса литья, °С	1260—1330;	
Скорость литья м/мин	150—250;	
Скорость подачи трубки, мм/мин	0,9—1,5;	

цесс литья микропровода, возрастал от 1,2 до 2 мм/мин. Таковы некоторые основные факторы, определяющие диаметр жилы микропровода из сплавов сопротивления. Некоторые обобщенные технологические режимы, применяемые в промышленных условиях при литье микропровода из сплавов, приведены в табл. 2 и 3 [34 и 54].

Технология литья микропровода из проводниковых материалов с диаметром жилы до 20 мкм аналогична рассмотренной. Литье микро-

Таблица 3

Технологический режим литья микропровода из хромоникелевых сплавов

$R_{п,}$ ком/м	Индуктор, град	Диаметр трубки, мм	Толщина стенки трубки, мм	Разреже- ние, мм вод столба	Скорость приема, м/мин.	Скорость подачи трубки, мм/мин.	Выход годного провода, %
10	80	9,5	1,25	4	90	1,3	40—50
	80	9,75	1,25	8	110	1,5	
	80	10,25	1,25	10	125	1,7	
	90	10,5	1,25	8	90	1,1	
	100	10,75	1,02	10	105	1,5	50—60
	100	11,0	1,2	10	100	1,1	
	120	10,75	1,25	8	90	0,7	
	120	11,0	1,1	8	100	1,1	
5	100	11,3	1,25	10	75	0,6	70
	120	11,0	1,1	10	60	1,0	80—90
	120	11,5	1,2	5—10	60	1,2	
	120	11,75	1,25	10	60	0,9	
2,5	120	12,0	1,2	10	40	1,2	70
	120	12,5	1,2	10	38	1,2	

провода с большими диаметрами осуществляется непрерывным способом, при котором соблюдается материальный баланс по металлу, что приводит к стабилизации некоторых из рассмотренных факторов, влияющих на выходные параметры микропровода. Рассмотрим связанные с этим особенности.

Исследования зависимости диаметра медного микропровода от v_d показывают, что чем больше диаметр получаемого микропровода, тем сильнее влияние на него изменений скорости литья. Так, при изменении скорости литья от 5 до 10 м/мин наклон соответствующих кривых характеризуется величиной $\frac{\Delta D}{\Delta v_d} \approx 6 \div 12$ в зависимости от условий литья. В случае больших скоростей имеем $\frac{\Delta D}{\Delta v_d} = 4 \div 8$ (D — диаметр по изоляции). Аналогичные соотношения имеют место и для зависимостей диаметра жилы медного микропровода от скорости литья.

При литье существенную роль играет и скорость подачи стеклянной трубки в зону микрованны v_n . Оказывается, что v_n влияет не только на толщину стеклянной изоляции микропровода, но и на диаметр жилы. Как установлено, увеличение массы микрованны приводит к ее удлинению вдоль оси вытягивания и к изменению диаметра микропровода. Изменением давления в трубке непосредственно в процессе литья можно поддерживать форму микрованны и диаметр микропровода постоянными. При прочих неизменных условиях на диаметр микропровода оказывает влияние изменение положения струи кристаллизационной жидкости. Получено, что удаление струи от микрованны (увеличение длины зоны растягивания) приводит к уменьшению диа-

Таблица 4

Межфазное натяжение чистых металлов в контакте со стеклом

Металл	Марка	Т, °С	δ_m , эрг см ²	Стекло	Размер кап- ли, мм		δ_{mc} , эрг см ²	W_n , эрг см ²	F , эрг см ²
					d	h			
Медь	„МО“	1083	1270	С39-1	11,90	3,89	620	920	380
	МІ				13,90	3,48	380	1160	620
Никель	„НО“	1450	1920	ТУ,	12,20	3,80	550	1640	1100
	С27-3			13,30	3,94	580	1610	1070	
Кобальт	„КО“	1490	1930	ТУ,	12,65	4,45	950	1250	710
				С27-3	12,20	4,52	1100	1100	560
Золото	Зл 999	1063	1130	С39-1	10,95	2,85	680	720	180

метра микропровода. Однако следует учитывать, что возможности изменения положения струн кристаллизационной жидкости в процессе литья весьма ограничены и не превышают 4—5 мм.

§ 3. Исходные материалы для литья микропровода

Рассмотренные специфические особенности технологии литья выдвигают ряд требований к металлам и сплавам.

В настоящее время для литья микропровода применяется медь, серебро, золото, сурьма, палладий, олово, кадмий, теллур, висмут, радий, свинец, платина и др. и сплавы на медной, никелевой, железной, кобальтовой и других основах. Возможность получения микропровода

Таблица 5

Межфазное натяжение кобальтовых сплавов в контакте со стеклом С27-3

Состав сплава	Т°, С	Размер капли, мм		$\delta_{мс}$ $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$
80% Co, 20% Cr	1470	12,50	0,43	720
60% Co, 40% Cr	1420	12,90	0,39	480
80% Co, 10% Cr, 10% Si	1320	12,15	0,42	810
60% Co, 3% Cr, 10% Mn	1250	13,05	0,43	520

из того или иного металла или сплава определяется целым комплексом свойств как самих металлов, так и стекла, применяемых для литья.

К свойствам металлов, которые предопределяют выбор стекла для литья, можно отнести температуру его плавления, температурный коэффициент расширения, химическую активность, поверхностное δ_m и

Таблица 6

Межфазное натяжение некоторых систем металл (сплав) — стекло

Металл (сплав)	Стекло	Межфазное натяжение, $\frac{\text{эрг}}{\delta \text{ см}^2}$	Микропровод получается
Медь . . .	ТУ	266	легко
	С39-1	320	легко
Серебро . .	С39-1	550	удовлетворительно
Манганин .	С39-1	420	легко
	ТУ	1110	получить не удается
Нихром . .	№11	695	удовлетворительно
	№11а	446	легко
Сплав ДН40С2	ТУ	550	легко
	С39-1	1150	получить не удается

межфазное $\delta_{мс}$ натяжение, адгезию W_a , коэффициент растекания F и др. Необходимо отметить, что эти свойства определяют не только возможность получения микропровода из той или иной пары металл—стекло, но также активно влияют на его выходные параметры.

Кристаллизационная способность стекол, применяемых для литья микропровода

Марка стекла	Область исследуемых температур, °С	Выдержка, мин	Время, через которое появляются первые признаки кристаллизации, мин	Температурная область кристаллизации, °С	Степень кристаллизации и вид кристаллической фазы	Максимальная скорость кристаллизации, мкм/мин.
С89-1	1050—500	120	30		Кристаллическая пленка	
С89-8	500—1780	300	90	100—860	Кристаллическая пленка измененного цвета	
С88-3	1050—600	180	45	760—980 (Макс. 880°)	Кристаллическая пленка	
С87-1	1135—600	300	300	650—700	Пленка прозрачна	
ТУ	1180—500	300	15	675—1170 (Макс. 850—950)	Кристаллич. <i>a</i> -кристобалит и корка	0,8 при 900°
С48-2	1130—500	170			Не кристаллизуется	
С48-2	500—1200		60	1000—735	Изменение цвета с синего на зеленый и коричневатозеленый	
С48-3	600—1160	300	5	910—1230 (Макс. 1150)	Кристаллическая корка	4,2 при 1160°
С40-1	1080—600	300	60	735—965	Кристаллическая пленка, <i>a</i> -кристобалит	0,05 при 700°
С39-1	1130—500	300	30	660—1050 (Макс. 850—910)	Кристаллический слой	0,15 при 850°
С37-2	1130—400	300	90	650—790 (Макс. 700—725)	Опалесценция. Расслоение на две стекловидные фазы	
С27-3	500—1200		300	880—1000 (1100—1300)	Изменение цвета от желтого до слабо-желтого	
ДГ-2	1180—500	300	40	715—1145 (Макс. 850—950)	Кристаллич. <i>a</i> -кристобалит	0,16 при 850°
А-54	500—1050	300	300	850—1050	Едва заметная пленка побежалости	
ТФ-2 №70	1050—500 1080—600	180 120	180	935—1100	Пленка прозрачна Кристаллическая корка с прорастанием в глубь кристаллов	

Возможности литья микропровода из того или иного материала определяются в первую очередь наличием стекла, обладающего необходимой вязкостью в рабочем интервале процесса литья, зависящем от температуры плавления исходного металла. Имеющиеся сейчас стек-

Таблица 8

Влияние дефектов стеклянных трубок на процесс литья микропроводов

Дефекты в трубках стекол марок С39-1, С27-3. ТУ		Диаметр микропровода, мкм	Скорость вытяжки микропровода, м/мин.	Примечания
тип неоднородностей	размеры, мм			
Камни	более 0,45 × 0,45	100 — 150	12,5	Прерывают процесс литья
	0,2 × 0,2	50 — 70	28,0	
	0,1 × 0,1	20 — 30	93,0	
Шлиры	более 1,5 × 1,5	100 — 200	8,8	"
	1,0 × 0,9	100 — 130	12,5	
	1,1 × 0,7	80 — 100	12,5	
	0,5 × 0,3	50 — 70	28,0	
	0,4 × 0,4	30 — 50	72,0	
Шлиры цепочечные	0,2 × 0,2	10 — 20	250,0	"
	следующие друг за другом на расстоянии менее 1 мм, \varnothing 0,1 — 0,4	10 — 130	250—12,5	
Капилляры воздушные	\varnothing 0,1 $l = 150 - 300$	20 — 160	—	Не прерывают процесса литья
Капилляры вакуумные	\varnothing до 0,3 $l = 150 - 300$	20 — 160	—	
Кристаллические включения в стекловидной оболочке	0,03 — 0,06	10 — 20	—	

ла позволяют применять для литья микропровода металлы и сплавы с температурой плавления не более 1500°C. Однако следует иметь в виду, что сама технология литья ограничений на температуру плавления не накладывает и освоение материалов с более высокой температурой плавления зависит от успеха разработки соответствующих стекол.

В настоящее время для литья микропровода применяют материалы с температурным коэффициентом расширения до $20 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, но, вообще, следует стремиться к уменьшению разности температурных коэффициентов расширения пары металл—стекло, особенно при литье микропровода с диаметром жилы свыше 25 мкм.

Материалы, используемые для литья, должны обладать сравнительно низкой величиной поверхностного и межфазного натяжения, высокой величиной адгезии и коэффициентом растяжения. Сейчас из-за слабой изученности этих величин не представляется возможным указать для них точные границы значений применительно к условиям литья. Однако представляет интерес изложить результаты некоторых исследований в этом направлении, которые позволяют оценить их порядок.

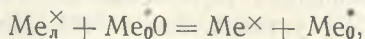
В табл. 4 [59] приведены результаты исследований этих свойств для ряда металлов.

Влияние дефектов стекла на стабильность диаметра литого микропровода

Металл или сплав	Марка стекла	Вид дефекта стекла трубки	Средний диаметр микропровода, мкм	Отклонение по диаметру		Примечание
				мкм	%	
Медь	С39-1	Шлиры \varnothing 0,1 — 0,3 мм, следующие друг за другом через 1 — 3 мм	40	\pm 3,15	7,9	—
		Цепь шлиров \varnothing 0,1 — 0,3 мм	44,1	\pm 2,15	4,9	—
		Цепь шлиров \varnothing 0,1 — 0,3 мм	40,4	\pm 4,85	12,0	—
		Цепь шлиров \varnothing 0,1 — 0,3 мм	56,6	\pm 5,6	10,0	—
		—	39,5	\pm 3,3	8,7	—
		—	45,9	\pm 2,05	4,4	—
		Однородное стекло	41,6	\pm 3,9	8,7	—
		—	41,6	\pm 2,7	6,6	—
		—	42,2	\pm 3,2	7,5	—
		—	40,7	\pm 3,0	7,4	—
			19,2	\pm 3,1	15,0	7 отклонений от среднего диаметра микропровода ($\pm 6 - 8$ мкм) при длине 280 м
60НГХ	ТУ	Кристаллическое включение в стекловидной оболочке	18,8	\pm 2,1	11,0	5 отклонений от среднего диаметра ($\pm 4 \div 5$ мкм) при длине 200 м
		Стеклотрубки сравнительно однородные	18,2	\pm 1,2	6,4	Отклонений более 2,5 мкм от среднего диаметра не наблюдается. Длина микропровода — 240 м

Из приведенных данных следует, что поверхностное натяжение значительно больше межфазного. Коэффициент растекания для этих металлов — величина положительная, свидетельствующая о том, что все исследованные металлы смачиваются соответствующими стеклами. Увеличение содержания кислорода значительно понижает межфазное натяжение, что видно на примере меди. Так, для меди „МО”, в которой кислорода меньше примерно в 4 раза, чем в М1, межфазное натяжение почти в 2 раза меньше.

В [59] отмечается, что характер влияния легирующего металла на межфазное натяжение определяется в основном его взаимодействием с растворенным кислородом и с основным компонентом стекла — кремнеземом:



в которых Me_l^x — легирующий металл, Me^* — основной металл. При протекании первой реакции имеет место обеднение основного металла кислородом, в результате чего увеличивается межфазное натяжение.

Стекла, применяемые

Марка стекла	Химический состав, вес %														
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	BaO	B ₂ O ₃	Li ₂ O	ZnO	PbO	TiO ₂	ZO ₂	F ₂	P ₂ O ₅
<i>Высокоглиноземистые</i>															
13,В	63,5	15,5	13,0	4,0	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	2,0	—
200	53,88	18,2	20,94	—	—	—	6,98	—	—	—	—	—	—	—	—
19	52,3	23,0	8,3	3,2	—	—	—	4,0	—	8,2	—	—	—	—	—
С37-1	57,6	29,0	7,4	8,0	—	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Боросиликатные</i>															
С87-1	76,0	4,0	0,5	—	—	6,0	3,0	10,5	—	—	—	—	—	—	—
58	74,2	3,0	2,2	1,6	3,0	4,5	—	11,2	—	—	—	—	—	—	—
ТУ	80,12	2,07	0,27	—	5,28	—	—	12,8	—	—	—	—	—	—	—
Пировар	77,5	1,3	1,6	0,7	5,5	0,7	—	12,0	—	—	—	—	—	—	—
Ц-101	66,5	7,5	—	—	3,0	4,0	3,0	15,0	1,0	—	—	—	—	—	—
С40-1	74,9	1,0	0,3	—	4,2	1,7	—	18	—	—	—	—	—	—	—
С49-2	66,9	3,5	—	—	3,9	5,4	—	293	—	—	—	—	—	—	—
С48-1	66,5	3,0	—	—	3,7	3,8	—	23,0	—	—	—	—	—	—	—
Ш-102	65,0	5,0	—	—	7,0	—	—	23,0	—	—	—	—	—	—	—
С37-2	70,2	—	—	—	1,0	1,2	—	27,0	0,6	—	—	—	—	—	—
С27-3	76,6	16,25	0,7	0,35	—	20,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ТУ	79,2	13,8	1,5	—	—	—	—	3,0	—	—	—	—	—	—	—
<i>Боросиликатные</i>															
Ш-105	62,0	3,5	—	—	2,1	3,2	13,2	9,5	—	—	—	6,8	—	—	—
Ш-103	58,0	5,0	—	—	6,0	3,0	—	22,5	3,0	—	—	3,0	1,0	—	—
<i>Свинцовосиликатные</i>															
37-1ВВ	75,0	2,4	—	—	4,8	1,8	—	12,6	—	—	3,4	—	—	—	—
С39-1	73,0	—	—	—	3,0	1,5	—	16,5	—	—	6,0	—	—	—	—
0010	63,5	2,5	1,0	—	7,5	5,5	—	—	—	—	20,0	—	—	—	—

Вторая же реакция способствует уменьшению межфазного натяжения. Влияние меди на межфазное натяжение никеля со стеклами С27-3 и П-15 типа пирекс (ТУ) установлено в [60]. Полученные там данные говорят о некотором снижении межфазного натяжения никеля при введении в него меди, а также о более низком межфазном натяжении никеля в паре со стеклом С27-3.

При исследовании влияния легирования кремнием сплавов типа марганца установлено, что увеличение содержания кремния до 1,5% сильно повышает межфазное натяжение марганца в паре со стеклом

Таблица 10

для литья микропровода

Температура размягчения, °С	Коэффициент термического расширения $\alpha = 10^{-7}$ град ⁻¹	Удельный вес, г/см ³	Модуль Юнга, кг/мм ²	Временное сопротивление растяжения, кг/мм ²	Зона отжига, °С		Гидролитический класс	Максимальный тангенс угла потерь при 20 °С			Максимальная диэлектрическая постоянная	
					нижняя граница	верхняя граница		1 Мгц	6 Мгц	10 Мгц	1 Мгц	10 Мгц

стекла

730	48,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
810	52,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
790	40,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
805	37,0	2,56	—	8,4	750	580	I	—	45	—	—	—

стекла

656	45,5	3,05	6300	4—6	360	450	III	—	20	—	—	—
660	50,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
635	33,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
650	41,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
560	47,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
620	40,0	2,2	—	7,0	620	520	IV	—	40	—	—	—
575	49,0	2,29	6670	3—5	535	410	V	40	40	95	6,0	5,5
560	48,0	2,25	6450	7,7	500	360	V	—	32	—	—	—
—	48,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
580	37,0	—	—	—	—	—	V	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
560	—	2,25	6250	—	—	560	—	—	—	—	4,1	4,6

стекла с TiP₂

690	46,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
560	48,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

стекла

620	45,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
640	40,0	2,5	6040	7,8	540	410	V	—	22	—	—	—
550	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

С39-1 [59]. Такие же результаты получены при легировании кремнием и бором сплавов типа константан [59].

Отмечается, что легирование хромом кобальтовых сплавов приводит к существенному снижению межфазного натяжения. Замена хрома кремнием вызывает некоторое повышение межфазного натяжения, а при введении марганца за счет хрома оно почти не изменяется. Количественные оценки этих изменений приведены в табл. 5 [59]. Не оказывают влияния на межфазное натяжение никель-медных сплавов присадки кремния и олова [60].

В [61] акцентируется внимание на необходимости учета при определении технологичности той или иной пары металл—стекло соотношения между работой адгезии на межфазной границе и силами поверхностного натяжения отдельных фаз стекла и расплава на границе с газовой средой. При этом работа адгезии между металлом и стеклом должна быть порядка 10^3 эрг/см², т. е. чем прочнее химические связи на границе стекло—металл, тем лучше будет заполняться стеклянный капилляр металлом. В этом случае приобретает значение устойчивость в интервале температур процесса промежуточной фазы и зависимость поверхностного отношения металла—сплава от температуры.

В [62] показано влияние межфазного натяжения на процесс литья микропровода (табл. 6), из которой следует, что чем меньше межфазное натяжение, тем легче получить микропровод. На основании сопоставления литейных свойств металлов и сплавов, из которых освоено литье микропровода, можно предположить, что вязкость сплавов и металлов в температурном интервале процесса должна быть не более 3—3,5 санти-пуаз. Этому сплаву с узким интервалом кристаллизации следует отдать предпочтение, так как сплавы с широким интервалом обладают максимальной вязкостью.

Не останавливаясь на характере изменения химического состава сплавов в процессе литья, отметим лишь, что они должны выбираться с учетом обеспечения изложенного комплекса литейных свойств и наименьшего изменения химического состава в процессе литья. Выбор стекла для литья микропровода определяется следующими условиями: разностью температурных коэффициентов расширения между металлом и стеклом, вязкостью в рабочем интервале температур процесса литья, межфазным натяжением, кристаллизационной способностью, качеством трубок и др. Вязкость стекол, применяемых для литья в температурном интервале процесса литья, должна находиться в пределах 10^3 — 10^4 пз. Кривые зависимости вязкости от температуры для некоторых типов стекол, нашедших применение при литье микропровода, рассмотрены в [57]. Вязкость стекла необходимо также учитывать как один из факторов, оказывающих влияние на выходные параметры микропровода, в частности на толщину изоляции. Так, в [51] показано, что с возрастанием вязкости толщина изоляции увеличивается.

Результаты исследований кристаллизационной способности стекол, используемых для литья, приведены в табл. 7 [63]. В работе [64] отмечается, что кристаллизация стекол в процессе литья может привести к нарушению процесса, в связи с чем рекомендуется, чтобы температура литья микропровода была выше верхнего температурного предела кристаллизации не менее чем на 30—50°C. Основные результаты этой работы приведены в табл. 8.

Кроме нарушения процесса литья дефекты трубок оказывают также влияние на стабильность диаметра литых микропроводов (табл. 9).

Свойства некоторых видов стекол, применяемых для литья, приведены в табл. 10.

§ 4. Применение статистических методов к анализу процесса литья микропровода

Рассмотрим применение физико-статистических методов к исследованию технологических особенностей литья микропровода. При этом остановимся на двух получивших широкое распространение методах планирования эксперимента и критериальном моделировании. Первый используется для выявления значимости тех или иных факторов и для розыскания оптимальных режимов, второй — позволяет получить общие технологические зависимости в определенном интервале изменения режимов литья.

При использовании метода математического планирования эксперимента в основу исследований положен структурный анализ процесса, из которого видно, что качественные показатели микропровода находятся в тесной зависимости от некоторых факторов (рис. 72). В эксперименте ставилось условие: путем постановки относительно малого числа опытов выявить наиболее значимые факторы для их дальнейшего использования в управлении процессом. В ходе опытов по исследованию

Таблица 11

Факторы технологического процесса литья медного микропровода и пределы их изменений

Условное обозначение факторов	Факторы	Нижний уровень	Верхний уровень
<i>A</i>	Вес микрованны	$4,2 \pm 0,3$	$6,4 \pm 0,6$
<i>B</i>	Температура микрованны, °С	1130 ± 15	1250 ± 15
<i>C</i>	Скорость приема микропровода, м/мин	180	220
<i>D</i>	Скорость подачи стекла, мм/мин.	1,5	2,5
<i>E</i>	Зона охлаждения, мм	min.	max
<i>G</i>	Размеры стеклянной трубки, мм	$14,1 \pm 0,2$	$14,7 \pm 0,2$
		$1,5 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$
<i>H</i>	Анод, А	1,55	1,6
<i>I</i>	Оператор и его субъективное отношение к процессу	№1	№2

Примечание. При максимальном охлаждении уровень кристаллизационной жидкости находится ближе к индуктору. Разница уровней нижнего и верхнего составляла 4—2 мм. Температура микрованны определялась оптическим пирометром ОППИР-09 без учета поправок на коэффициент черноты.

дованию технологического процесса, проводимых с участием Ю. К. Покровского, использовалась двухпостовая установка типа АЛМ-5, в качестве примерных технологических режимов исследовались условия, близкие для литья медного микропровода с $d_{ж} = 20$ мкм на основе шихтовой меди марки М1, стекла ТУ. Управление температурными режимами процесса при заданном весе микрованны, анодном токе и т. д. в опытах обеспечивалось отсосом воздуха из зоны микрованны. Вклад,

вносимый деформацией капли и изменениями длины зоны растягивания на размеры микропровода, отдельно не оценивался. При анализе технологического процесса применялся метод случайного баланса [65]. Из ряда факторов, влияющих на ход технологического процесса, ранжировалась степень влияния на $d_{ж}$ микропровода и толщину его изоляции восьми факторов (табл. 11).

Для построения матрицы планирования эксперимента по схеме случайного баланса использовалась случайная выборка из полного факторного эксперимента 2^4 . При этом согласно принятой матрице было поставлено 16 отдельных опытов, из которых каждый повторялся трижды [66]. Во всех опытах технологический процесс литья микропровода велся в условиях варьирования каждого фактора на верхних (+) и нижних (-) уровнях. В ходе исследований определялось по данным среднее значение для трех опытов с учетом, что в каждом опыте d полученного образца рассчитывался, исходя из $R_{п}$ его 10 случайных 10-сантиметровых отрезков, по которым одновременно рассчитывалось среднее значение $\Delta_{из}$ для каждого отрезка и опыта. Матрица планирования эксперимента для 8 факторов по методу случайного баланса приведена в табл. 12.

Таблица 12

Матрица планирования эксперимента по случайному балансу для 8 факторов, варьируемых на двух уровнях

№ опыта	A	B	C	D	E	G	H	I	Размеры микропровода, мкм	
									d, мкм	Δ , мкм
1	+	+	+	-	-	+	-	-	10,9	9,0
2	-	+	-	-	-	+	-	+	13,7	12,6
3	+	-	+	+	-	+	+	+	25,1	3,5
4	+	-	+	-	+	+	-	-	22,5	2,7
5	-	+	-	-	+	+	-	+	23,5	3,7
6	-	+	-	+	+	+	+	-	14,6	11,7
7	+	+	-	-	-	-	-	-	14,6	10,2
8	-	-	+	+	+	-	-	+	22,2	6,5
9	+	-	-	+	+	+	+	+	28,3	6,1
10	+	+	+	+	+	-	+	+	11,3	4,3
11	-	-	+	-	+	-	-	-	23,1	3,0
12	+	-	-	-	+	-	+	-	26,2	6,1
13	+	+	-	+	-	-	+	-	8,8	14,2
14	-	+	+	+	+	-	-	+	9,1	11,4
15	-	+	+	-	+	+	+	+	13,8	6,6
16	-	-	-	+	-	-	+	+	23,9	7,5

Статистический анализ результатов всех 16 опытов дал возможность выделить наиболее значимые факторы. Первоначально эффекты выделялись визуально путем сравнения величины медиан, а также по количеству выделяющихся точек на диаграммах рассеяния. Количес-

венная оценка выделенных эффектов производилась с помощью вспомогательных таблиц с двумя и тремя входами [67].

На первом этапе статистического анализа для определения эффективности воздействия технологических факторов на $d_{ж}$ микропровода и его изоляцию были выделены первые два фактора: фактор B и фактор E . Для количественной оценки выделенных эффектов была использована вспомогательная табл. 13 с двумя входами. В клетках табл. 13 записывались результаты опытов с распределением их по различным комбинациям уровней факторов B и E . Так, например, в верхней первой клетке вписаны числа: 25,1; 22,2; 23,9. Эти величины получены в опытах, где факторы B и E находились на нижнем уровне.

Таблица 13

Вспомогательная таблица с двумя входами для вычисления эффектов B и E

		$E +$	$E -$		$E +$	$E -$
$B +$		11,3	10,9	$B -$	22,5	25,1
		9,1	13,7		23,5	22,2
		<u>13,8</u>	14,6		28,3	<u>23,9</u>
		34,2	14,6		23,1	71,2
			<u>8,8</u>		<u>26,2</u>	
		62,6	123,6			
		$\bar{y}_1 = 11,4; \bar{y}_2 = 12,5$			$\bar{y}_3 = 24,7; \bar{y}_4 = 23,7$	

Вычисление линейных факторов производилось по формулам

$$B = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2}{2} - \frac{\bar{y}_3 + \bar{y}_4}{2}$$

$$E = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_3}{2} - \frac{\bar{y}_2 + \bar{y}_4}{2}$$

Подставляя значения y_1, y_2, y_3, y_4 в эти формулы, соответственно получим $B = -12,20, E = 0,05$. Значимость полученных эффектов проверялась по t -критерию. Например, для оценки значимости фактора B

$$t_B = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_2) - (\bar{y}_3 + \bar{y}_4)}{S_p}$$

где $S_p = S_R \sqrt{\sum \frac{1}{\Pi_i}}$; Π_i — число наблюдений в клетках вспомогательной таблицы; S_R — квадратичная ошибка, характеризующая остаточное рассеяние.

При количественной оценке по t -критерию эффект E для $d_{ж}$ оказался незначим, в то время как для толщины изоляции оба эффекта

значимы. При корректировке результатов наблюдений с целью исключения влияния выделенных эффектов ко всем результатам, полученным на верхнем уровне B , было прибавлено (вычисленное) значение эффекта B (с противоположным знаком) $+12,2$. Аналогично к значениям толщины изоляции, полученным на верхнем уровне B , прибавлено $5,2$; к значениям, полученным на верхнем уровне E , $+1,9$.

На основании скорректированных результатов эксперимента построены новые диаграммы рассеяния по основным эффектам и некоторым эффектам взаимодействия. После первой корректировки для $d_{ж}$ визуально выделены эффекты: C ; H ; BD ; для $\Delta_{из}$ C ; D ; G . Для $d_{ж}$ значимым оказался эффект C , а для изоляции — все три эффекта C ; D ; G . Данные эксперимента были вновь скорректированы по известному принципу, при этом ко всем результатам, полученным на верхнем уровне C , для размера $d_{ж}$ прибавлялось вычисленное значение численного эффекта C с противоположным знаком, т. е. $+1,7$, а к размерам изоляции — соответственно: $+2,6$; $-1,0$; $+1,3$. Таким образом, корректировка результатов производилась до тех пор, пока выявленные визуально факторы оказывались незначимыми после проверки их по t -критерию. После подобной проверки анализ экспериментального материала заканчивался. Считалось, что остальные эффекты взаимодействия следует относить к шумовому полю.

На основании приведенных опытов, пользуясь методом случайного баланса, было выделено два эффекта, наиболее сильно влияющие на $d_{ж}$, и пять эффектов на $\Delta_{из}$. Установлено, что с повышением температуры микрованны $d_{ж}$ интенсивно уменьшается, а $\Delta_{из}$ увеличивается, что из всех технологических факторов фактор B является единственным, дающим четкое распределение результатов опытов. Значимо для уровня $0,05$: $t_{0,05}(16) = 2,12$; $t_{0,05}(14) = 2,14$; $t_{0,05}(10) = 2,23$; $t_{0,05}(8) = 2,30$.

Следующим по значимости эффектом является уровень кристаллизационной жидкости. С уменьшением расстояния между струей кристаллизатора и индуктором $\Delta_{из}$ уменьшается (численное значение эффекта E в данном случае — отрицательная величина).

Значимыми для $\Delta_{из}$ оказались эффекты D и G — скорость подачи стекла и размеры стеклянной трубки. С увеличением скорости подачи стекла при прочих равных условиях $\Delta_{из}$ увеличивается, а при увеличении диаметра стеклянной трубки уменьшается. Влияние двойных эффектов взаимодействия на первом этапе исследований выявить не удалось, однако их присутствие не исключено и может быть, по-видимому, выявлено с повышением точности опытов.

Для установления связи между геометрическими параметрами микропровода и условиями литья используем метод анализа размерностей теории подобия [68, 69].

Предыдущий анализ дает возможность предположить, что в про-

цессе литья микропровода имеют место следующие функциональные связи между существенными для процесса параметрами:

$$f(d_{\text{ж}}, \Delta, h, \rho, \delta, V, V', \eta_0, \eta'_0, T_0, T_1, T_2, T_3, T_4), \quad (4.4.1)$$

$$\varphi(\Delta_{\text{из}}, \Delta, h, \rho, \delta, V, V', \eta_0, \eta'_0, T_0, T_1, T_2, T_3, T_4). \quad (4.4.2)$$

Здесь $d_{\text{ж}}$ — диаметр металлической жилы микропровода; $\Delta_{\text{из}}$ — толщина стеклянной изоляции, Δ — внешний диаметр стеклянной трубки, h — длина зоны вытягивания (расстояние от основания первичного конуса до верхней границы кристаллизатора), V — скорость литья (вытягивания), V' — скорость подачи стеклянной трубки, η_0 — коэффициент кинематической вязкости стекла, η'_0 — коэффициент кинематической вязкости сплава, T_0 — рабочая температура микропечи, T_1 и T_2 — верхняя и нижняя точки температуры размягчения стекла, T_3 и T_4 — верхняя и нижняя точки температурного интервала затвердевания сплава, ρ — радиус металлического ядра микрованны, которую во всех опытах условно можно считать шаром (если D — плотность сплава, M — вес микрованны, то $\rho = \sqrt[3]{\frac{3M}{4\pi D}}$), δ — толщина стенки стеклянной трубки.

Формулы размерностей для входящих в (4.4.1) и (4.4.2) параметров следующие:

$$[d_{\text{ж}}] = [\Delta_{\text{из}}] = [\Delta] = [\delta] = [h] = [\rho] = \text{см},$$

$$[V] = [V'] = \frac{\text{см}}{\text{сек}},$$

$$[\eta_0] = [\eta'_0] = \frac{\text{см}^2}{\text{сек}},$$

$$[T_0] = [T_1] = [T_2] = [T_3] = [T_4] = \text{град.}$$

Выбираем в качестве величин с независимыми размерностями следующие три: $[\rho] = \text{см}$, $[T_0] = \text{град}$, $[\eta_0] = \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$. Выразим размерности остальных величин через размерности независимых получим таким образом 12 уравнений связи:

$$[d_{\text{ж}}] = [\rho], [\Delta_{\text{из}}] = [\rho], [\Delta] = [\rho], [\delta] = [\rho], \quad (4.4.3)$$

$$[h] = [\rho], [V] = \left[\frac{\eta_0}{\rho} \right], [V'] = \left[\frac{\eta'_0}{\rho} \right], [T_0] = [T_1],$$

$$[T_0] = [T_2], [T_0] = [T_3], [T_0] = [T_4], [\eta'_0] = [\eta_0].$$

Из этих уравнений следует

$$\left[\frac{d_{\text{ж}}}{\rho} \right] = 1, \left[\frac{\Delta_{\text{из}}}{\rho} \right] = 1, \left[\frac{\Delta}{\rho} \right] = 1, \left[\frac{\delta}{\rho} \right] = 1, \left[\frac{h}{\rho} \right] = 1,$$

$$\left[\frac{V\rho}{\eta_0}\right] = 1, \left[\frac{V'\rho}{\eta_0}\right] = 1, \left[\frac{\eta_0}{\eta_0}\right] = 1, \left[\frac{T_0}{T_1}\right] = 1,$$

$$\left[\frac{T_0}{T_2}\right] = 1, \left[\frac{T_0}{T_3}\right] = 1, \left[\frac{T_0}{T_4}\right] = 1.$$

Согласно π -теореме теории подобия (4.4.1) и (4.4.2) могут быть заменены безразмерными уравнениями

$$F\left(\frac{d_{жк}}{\rho}, \frac{\Delta}{\rho}, \frac{\delta}{\rho}, \frac{h}{\rho}, \frac{V\rho}{\eta_0}, \frac{V'\rho}{\eta_0}, \frac{\eta_0}{\eta_0}, \frac{T_0}{T_1}, \frac{T_0}{T_2}, \frac{T_0}{T_3}, \frac{T_0}{T_4}\right), \quad (4.4.4)$$

$$\Phi\left(\frac{\Delta_{из}}{\rho}, \frac{\Delta}{\rho}, \frac{\delta}{\rho}, \frac{h}{\rho}, \frac{V\rho}{\eta_0}, \frac{V'\rho}{\eta_0}, \frac{\eta_0}{\eta_0}, \frac{T_0}{T_1}, \frac{T_0}{T_2}, \frac{T_0}{T_3}, \frac{T_0}{T_4}\right). \quad (4.4.5)$$

Известно, что не изменяя общего числа критериев, входящих в левые части (4.4.4) и (4.4.5), можно заменить любой из них степенным комплексом, составленным из остальных критериев. В соответствии со сказанным, заменим в уравнениях

$$\frac{T_0}{T_1} \rightarrow \left(\frac{T_0}{T_1}\right)^1 \cdot \left(\frac{T_0}{T_2}\right)^{-1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad \frac{T_0}{T_3} \rightarrow \left(\frac{T_0}{T_3}\right)^1 \left(\frac{T_0}{T_4}\right)^{-1} = \frac{T_4}{T_3},$$

а затем, решив их относительно $\frac{d_{жк}}{\rho}$ и $\frac{\Delta_{из}}{\rho}$, получим

$$\begin{aligned} \frac{d_{жк}}{\rho} = & A \left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^{\alpha_1} \left(\frac{\delta}{\rho}\right)^{\alpha_2} \left(\frac{h}{\rho}\right)^{\alpha_3} \left(\frac{V\rho}{\eta_0}\right)^{\alpha_4} \left(\frac{V'\rho}{\eta_0}\right)^{\alpha_5} \left(\frac{T_0}{T_2}\right)^{\alpha_6} \times \\ & \times \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\alpha_7} \left(\frac{T_0}{T_4}\right)^{\alpha_8} \left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{\alpha_9} \left(\frac{\eta_0}{\eta_0}\right)^{\alpha_{10}}, \end{aligned} \quad (4.4.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta_{из}}{\rho} = & B \left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^{\beta_1} \left(\frac{\delta}{\rho}\right)^{\beta_2} \left(\frac{h}{\rho}\right)^{\beta_3} \left(\frac{V\rho}{\eta_0}\right)^{\beta_4} \left(\frac{V'\rho}{\eta_0}\right)^{\beta_5} \times \\ & \times \left(\frac{T_0}{T_2}\right)^{\beta_6} \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\beta_7} \left(\frac{T_0}{T_4}\right)^{\beta_8} \left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{\beta_9} \cdot \left(\frac{\eta_0}{\eta_0}\right)^{\beta_{10}}. \end{aligned} \quad (4.4.7)$$

Логарифмируя (4.4.6) и (4.4.7), имеем

$$\begin{aligned} \lg \frac{d_{жк}}{\rho} = & \lg A + \alpha_1 \lg \frac{\Delta}{\rho} + \alpha_2 \lg \frac{\delta}{\rho} + \alpha_3 \lg \frac{h}{\rho} + \\ & + \alpha_4 \lg \frac{V\rho}{\eta_0} + \alpha_5 \lg \frac{V'\rho}{\eta_0} + \alpha_6 \lg \frac{T_0}{T_2} + \alpha_7 \lg \frac{T_2}{T_1} + \\ & + \alpha_8 \lg \frac{T_0}{T_4} + \alpha_9 \lg \frac{T_4}{T_3} + \alpha_{10} \lg \frac{\eta_0}{\eta_0}. \end{aligned} \quad (4.4.8)$$

$$\lg \frac{\Delta_{\text{из}}}{\rho} = \lg B + \beta_1 \lg \frac{\Delta}{\rho} + \beta_2 \lg \frac{\delta}{\rho} + \beta_3 \lg \frac{h}{\rho} + \beta_4 \lg \frac{V\rho}{\eta_0} + \beta_5 \lg \frac{V'\rho}{\eta_0} + \beta_6 \lg \frac{T_0}{T_2} + \beta_7 \lg \frac{T_2}{T_1} + \beta_8 \lg \frac{T_0}{T_4} + \beta_9 \lg \frac{T_4}{T_9} + \beta_{10} \lg \frac{\eta_0'}{\eta_0} \quad (4.4.9)$$

Константы $A, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{10}$ и $B, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{10}$ определяются экспериментально. Для этого составляются системы из 11 уравнений вида (4.4.8) и (4.4.9), причем каждому ставится в соответствие один опыт, и решаются совместно.

Изучение влияния технологических параметров процесса литья на диаметр микропровода проводилось в следующих пределах их изменения (табл. 14):

Таблица 14

Параметры технологического режима

Режим генератора	{	накал, в	- 6-7
		анод, а	- 0,8-1,0
		сетка, а	- 0,18-0,20
Индуктор	{	α , град.	- 95
		H , см	- 1,4
		h , см	- 0,1
Сплав		- МНМЦ-3-12	
Стекло		- П-15 №17	
Наружный диаметр стеклянной трубки Δ , см		- 0,9-1,2	
Толщина стенки стеклянной трубки δ , см		- 0,1-0,13	
Расстояние от основания первичного конуса вытягивания до кристаллизатора h ,		- 0,65-0,9	
Скорость литья $V, \frac{\text{см}}{\text{сек}}$		- 170-500	
Скорость подачи стеклянной трубки $V', \frac{\text{см}}{\text{сек}}$		- $0,8 \cdot 10^{-3}$ - $3,3 \cdot 10^{-3}$	
Температура процесса литья $T, ^\circ\text{C}$		- 1180 - 1240	
Радиус металлического ядра микрованны ρ , см		- 0,32-0,37	

Выбрав произвольное количество опытов, получим значения критериев $\frac{d_{\text{ж}}}{\rho}, \frac{\Delta_{\text{из}}}{\rho}, \frac{\Delta}{\rho}, \frac{h}{\rho}, \dots$ для каждого опыта и их логарифмы. Найдя, таким образом, данные для уравнений вида (4.4.8) и (4.4.9) и решив их совместно, получим значения коэффициентов A, α_i и B, β_i . Подставляя найденные численные значения коэффициентов, получаем формулы для расчета диаметра жилы и толщины изоляции по основным технологическим параметрам

$$d_{\text{ж}} = 4,07 \cdot 10^{54-0,042 T_0} \rho \left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^{-1,27} \left(\frac{V\rho}{\eta_0}\right)^{-0,35} \times \left(\frac{V'\rho}{\eta_0}\right)^{0,75} \left(\frac{T_0}{T_2}\right)^{17,9} \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{0,4} T_0^{-452} \quad (4.4.10)$$

$$\Delta_{\text{из}} = 1,82 \cdot 10^{0,046 T_0 - 58} \cdot \rho \cdot \left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^{2,33} \left(\frac{\delta}{\rho}\right)^{0,29} \left(\frac{h}{\rho}\right)^{-1,15} \left(\frac{V\rho}{\eta_0}\right)^{-0,23} \times \\ \times \left(\frac{V'\rho}{\eta_0}\right)^{0,25} \left(\frac{T_0}{T_2}\right)^{19,2} \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{443-0,4 T_0} \quad (4.4.11)$$

Сплав марганца заправлялся порциями весом 2,0—2,1 г и к концу наладки вес металлического ядра составлял 1,8—1,9 г. Во время процесса литья смена нумерованных бобин на приемном механизме производилась через каждые 60—90 сек, причем за несколько секунд до смены бобины микрованна фотографировалась и проверялась по температуре. Затем производилось изменение одного из параметров и процесс повторялся.

Положение капли в индукторе, ее геометрические размеры, расстояние от первичного конуса растягивания до кристаллизатора определялись путем совмещения проектируемого негативного изображения микрованны с увеличенным изображением масштабной линейки, помещенной в индуктор на место стеклянной трубки, с нулем на уровне кристаллизатора. На основании этих измерений определялись параметры ρ и h . Температурные зависимости вязкости стекол, а также значения T_1 и T_2 брались из работы [57]. Измерения $d_{\text{ж}}$ и $\Delta_{\text{из}}$ проводились на поляризационном микроскопе МИН-8 ($\times 900$) в 5—6 точках в начале каждой бобины на отрезках длиной 10—15 м, на которые приходится измерения температуры и фотографирования. На основании этих измерений строились графики зависимостей $d_{\text{ж}}$ и $\Delta_{\text{из}}$ от различных технологических параметров.

Ввиду отсутствия данных по вязкости сплавов в зависимости от температуры девятый, десятый и одиннадцатый члены с коэффициентами $\alpha_8, \alpha_9, \alpha_{10}$ и $\beta_8, \beta_9, \beta_{10}$ в полученных уравнениях не фигурируют и их влияние (равно как и всех остальных не учитываемых факторов) учитывается коэффициентами A и B . Приведенные критериальные формулы справедливы только для того диапазона значений входящих в них критериев, который имел место в опытах. Этот диапазон определяется соотношениями

$$2,57 \leq \frac{\Delta}{\rho} \leq 3,43,$$

$$0,286 \leq \frac{\delta}{\rho} \leq 0,372,$$

$$1,86 \leq \frac{h}{\rho} \leq 2,72,$$

$$2,13 \cdot 10^{-2} \leq \frac{V\rho}{\eta_0} \leq 6,36 \cdot 10^{-2},$$

$$1,06 \cdot 10^{-7} \leq \frac{V'\rho}{\eta_0} \leq 4,24 \cdot 10^{-7},$$

$$1,62 \leq \frac{T_0}{T_2} \leq 1,70 \text{ (для стекол П-15),}$$

$$1,71 \leq \frac{T_0}{T_2} \leq 1,80 \text{ (для стекла № 17).}$$

Формулы (4.4.10) и (4.4.11) показывают, что наиболее сильное влияние на диаметр жилы и толщину изоляции оказывает критерий $\frac{T_0}{T_2}$ и критерий $\frac{T_2}{T_1}$, при этом влияние $\frac{T_2}{T_1}$ больше, чем $\frac{T_0}{T_2}$. Сильная зависимость коэффициентов A и B от температуры еще раз показывает, что на диаметр микропровода влияет целый ряд факторов, не выраженных явно в приведенных формулах. Обращает на себя внимание отсутствие влияния (в пределах ошибки опыта) на диаметр жилы критерия $\frac{h}{p}$.

Экспериментальная проверка (4.4.10) и (4.4.11) показала, что расхождения между опытными значениями $d_{ж}$ и $\Delta_{из}$ и вычисленными достигают в отдельных случаях 20%. Это объясняется погрешностью при определении геометрических параметров микропровода, отсутствием абсолютного постоянства технологических параметров во время опытов и погрешностью, вносимой при измерении, и нестационарностью внешних условий.

В то же время, несмотря на относительно большую погрешность, полученные аналитические функциональные зависимости имеют определенное практическое и теоретическое значение, так как связывают выходные и входные параметры процесса литья микропровода.

§ 5. Нормирование труда и организация производства литого микропровода

Производственные показатели литья микропровода в известной мере определяются на основе норм труда, от которых во многом зависит использование материальных и трудовых ресурсов предприятий и ритмичность их работы. Остановимся на анализе трудовых затрат в производстве медного микропровода, проведенного на основе хронометража и фотографии рабочего дня операторов литья микропровода.

Исследования показывают, что по отношению к производственному процессу рабочее время необходимо разделить на время, связанное с выполнением производственного задания, и время потерь. К подготовительно-заключительному (ПЗ) следует относить время, которое оператор затрачивает на подготовку средств производства с целью выполнения нового производственного задания и всех функций, связанных с окончанием работы. Оно включает время, затрачиваемое на получение материалов, рабочего наряда, технологической документации, осмотр

и настройку установки для литья микропровода, сдачу рабочего наряда и остатков материалов.

Время, которое затрачивает оператор на непосредственное выполнение операций по изготовлению микропровода, повторяемое с изготовлением определенного количества микропровода, следует относить к оперативному времени (ОП). (ОП) подразделяется на основное (технологическое) и вспомогательное.

К основному (О) относим время собственно процесса литья микропровода, т. е. то, за которое осуществляется непосредственная цель технологического процесса (изменение формы, размеров, внешнего вида, физико-химических и механических свойств, состояния и положения обрабатываемых материалов). При этом время, затрачиваемое оператором на выполнение действий, которые создают возможность выполнения основной работы, будет относиться к вспомогательному (В). (В) повторяется в определенной последовательности с каждым технологическим переходом или через определенное количество переходов. В нашем случае к нему относятся затраты времени на заправку и дозаправку микрованной, съем полученной продукции (микропровода), на смену стеклянной трубки, на приемы по управлению с целью создания и поддержания условий протекания процесса получения микропровода и др.

Учитывая, что часть вспомогательных операций (корректировка скорости подачи стекла, величина отсоса, центровка капли) производится в период автоматической работы установки, необходимо при расчете норм (В) затраты времени на операции, перекрываемые процессом литья микропровода, исключать и учитывать их лишь при определении занятости оператора.

Таблица 15

Степень утомляемости оператора литья микропровода

Фактор	Балльная оценка утомляемости оператора	Характеристика фактора, тип производства, соответствующие данному баллу
Физические усилия	1	Незначительные, до 5 кг
Монотонность	2	Повышенная. Время на операцию до 0,1 мин
Темп работы	1	Крупносерийное и массовое производство
Рабочее положение	1	Стесненное. Необходимость часто нагибаться, но не ниже пояса; поворачивать корпус, но не более чем на 45°; поднимать руку, но не выше плеча
Степень напряжения	2	Повышенная. Работы, требующие значительного напряжения внимания и зрения
Микроклиматические условия	2	Температурные условия — повышенная температура от 30°C до 35°C, наличие лучистой энергии
Уровень громкости шума	1	Умеренный. Возможен нормальный разговор на расстоянии 1,5 м друг от друга.

Из опыта работы следует, что к времени на обслуживание рабочего места (ОМ) необходимо относить затраты на уход за рабочим местом и поддержание его в рабочем состоянии на протяжении всей смены, подналадку установки в процессе работы. В (ОМ) не должны включаться редко повторяющиеся трудоемкие работы, например капитальный и средний ремонт установки. Наряду с этим затраты рабочего времени на текущий мелкий ремонт технологического оборудования продолжительностью не более 15 мин. в каждом случае должны учитываться при расчете норм. В табл. 15 приведен фактический баланс рабочего времени операторов, выявленный и составленный на основании среднестатистических данных фотографий рабочего дня. Анализ показывает наличие резервов в повышении выпуска микропровода. Ниже приведены организационно-технические мероприятия, которые целесообразно осуществить с целью увеличения выпуска микропровода. При нормировании (ПЗ) оператора в массовом выпуске микропровода следует исходить из следующей организации производства:

1. Переналадку и ремонт оборудования для литья производит рабочий (наладчик).

2. Нужные материалы доставляются к рабочему месту подсобниками. Отбор готовой продукции осуществляется на рабочем месте.

3. Работы, связанные с подготовкой исходных материалов (стеклянных трубок, проволоки и др.), производится на подготовительном участке. Как показал опыт работы, в этом случае (ПЗ) не превышает 2% продолжительности рабочего дня. Уместно сравнить полученное значение (ПЗ) и (ПЗ) в металлообрабатывающей промышленности, где оно равно в мелкосерийном производстве 8—15%, крупносерийном 3—5, массовом 1—3%.

Опыт НОТ показывает, что величина необходимых оператору перерывов для отдыха в процессе выполнения задания, а также последовательность перерывов на протяжении рабочей смены зависит от многочисленных факторов, для определения которых необходима совместная работа специалистов, занимающихся нормированием и физио-

Таблица 16

Шкала перехода от количества баллов к необходимому времени отдыха

Сумма баллов по утомляемости	Время на отдых в % от оперативного времени	Сумма баллов по утомляемости	Время на отдых в % от оперативного времени
0	2	8—9	8
1	3	10—11	9
2	4	12—13	10
4—5	5	14—15	11
6—7	6	16—17	12

логией труда. Поэтому пока необходимо применять аналитический метод определения времени на отдых, основанный на учете физиологических и технологических факторов, влияющих на утомляемость оператора, с оценкой их по балльной системе [70]. При расчете норм отдыха операторов учитывались следующие факторы: усилия оператора и монотонность его работы, темп работы, положение оператора во время работы, напряжение внимания, микроклиматические условия (температура и загрязненность воздуха), шумы, вибрация. Расчеты степени утомляемости оператора проведены по указанным характеристикам (табл. 15).

Таблица 17

Фактический и проектируемый баланс рабочего времени оператора, составленный на основании среднестатистических данных фотографии рабочего дня и технических нормативов

Наименование категорий затрат времени	Фактический баланс рабочего времени				Проектируемый баланс рабочего времени	
	сумма продолжительности, мин	в том числе перекрываемое, мин	% ко времени наблюдения	затраты времени, подлежащие сокращению, мин	продолжительность времени, мин	% к продолжительности рабочей смены
Подготовительно-заключительное,	(47,5)	(3,5)	(9,9)	(37,9)	(9,6)	(2,0)
в том числе неперекрываемое	44	—	9,2	37,4	9,6	2,0
Оперативное, в том числе неперекрываемое	(285,1)	(6,0)	(59,4)	(147,3)	(432,4)	(90,1)
.	279,1	—	58,2	143,2	422,3	88,0
Обслуживание рабочего места, в том числе неперекрываемое	(8,5)	(0,6)	(1,8)	—	(8,5)	(1,8)
.	7,9	—	1,6	—	7,9	1,6
Время потерь из-за неполадок на производстве по организационным причинам	10,4	—	2,1	10,4	—	—
Работы по литью микропровода вне программы	80,6	—	16,8	80,6	—	—
Перерывы, зависящие от рабочего (в том числе межоперационные паузы, отдых и время на личные надобности)	58,0	—	12,1	17,8	40,2	8,4
Итого по сумме замеренных продолжительностей	490,1	10,1	—	294,0	490,7	—
Итого по времени наблюдения (смены)	480	—	100	289,4	480,0	100

Для перехода от количества баллов к необходимому времени на отдых используется шкала согласно табл. 17.

На основании данных многочисленных фотографий рабочего дня других специальностей величину затрат времени на естественные нужды оператора принимаем в размере 2% (ОП).

С учетом изложенного приведен проектируемый баланс рабочего времени оператора. Как следует из табл. 16, нормальная величина (ОП) определяется как разница между временем наблюдения (смены) и суммой нормальных затрат (ПЗ), (ОМ) и регламентируемого времени на отдых. Использование рабочего времени оператора характеризуется при этом показателями табл. 18. Сопоставляя проектируемый баланс

Таблица 18

Характеристика использования рабочего времени оператора

Процент оперативного времени	$K_1 = \frac{T_o + T_b}{T} \cdot 100 = \frac{T_{оп}}{T} \cdot 100$	$K_1 = \frac{195,3 + 83,8}{480} = 58,0\%$
Процент потерь, зависящих от рабочего	$K_2 = \frac{T_{пр} + T_{отд}}{T} \cdot 100$	$K_2 = \frac{58,0 - 40,2}{480} \cdot 100 = 3,7\%$
Процент потерь по организационным причинам и вследствие работ по литью микропровода вне программы	$K_3 = \frac{T_{пн} + T_{ппр}}{T} \cdot 100$	$K_3 = \frac{91}{480} \cdot 100 = 18,9\%$
Коэффициент полезного времени использования оборудования	$K_{п-в} = \frac{T_o}{T - T_{пл.рем}}$	$K_{п-в} = \frac{195,3}{480} = 0,41$

рабочего времени с фактическим, видим, что за счет устранения работ, не связанных с литьем микропровода, излишних затрат рабочего времени и потерь в производстве оперативное время увеличивается с 279,1 до 422,3 мин, что составит 88,0% времени рабочей смены. Производительность труда оператора по изготовлению микропровода повышается на 51,3%. Хронометраж рабочего времени дает возможность изучить рациональность построения и осуществления трудового процесса при капельном способе литья микропровода. При литье микропровода (ОП) (при проектируемом балансе рабочего времени) равняется 88% длительности смены, (О) при этом составляет 70% от (ОП). Более 65% (ОП) процесса идет без вмешательства оператора (табл. 18).

T_o , T_b , $T_{оп}$ — соответственно основное, вспомогательное и оперативное время за смену (в мин); $T_{гр}$ — перерывы в работе по причинам, зависящим от оператора за смену (в мин); $T_{отд}$ — необходимое (регламентированное) по нормативам время (в мин) на отдых и личные надобности оператора за смену; $T_{пн}$ — время (в мин) работы оператора по литью (МП) вне программы за смену; $T_{ппр}$ — время, предусмотренное на плановый ремонт оборудования; $T_{оп.ф}$ — фактическое оперативное время (в мин) за смену; $T_{оп.м}$ — оперативное время (в мин) по проектируемому балансу рабочего времени в смену (табл. 18 и 19).

Проектируемое повышение производительности труда оператора

За счет устранения потерь времени вследствие неполадок на производстве по организационным причинам и устранения работ по литью микропровода вне программы	$M_1 = \frac{(T_{\text{пн}} + T_{\text{ппр}}) \cdot 100}{T_{\text{опф}}}$	$M_1 = \frac{91,0}{279,1} \cdot 100 = 32,6 \%$
За счет устранения потерь, зависящих от оператора	$M_2 = \frac{(T_{\text{пр}} - T_{\text{ол}}) \cdot 100}{T_{\text{опф}}}$	$M_2 = \frac{(58,0 - 40,2) \cdot 100}{279,1} = 6,4 \%$
За счет устранения потерь в производстве и ликвидации работ, не связанных с литьем микропровода на программу	$M_3 = \frac{T_{\text{опм}} - T_{\text{опф}}}{T_{\text{опф}}} \cdot 100$	$M_3 = \frac{422,3 - 279,1}{279,1} \cdot 100 = 51,3 \%$

Проведенный анализ позволяет характеризовать технологический процесс получения медного микропровода, имеющего отношение внешнего диаметра к жиле 1,2—2,0, как процесс с удовлетворительной степенью автоматизации и механизации.

Как показывают наблюдения, большие потери рабочего времени связаны с операциями по наладке процесса литья. Удельный вес ручных операций при этом составляет около 70%.

Почти треть времени наладки приходится на восстановление веса металла в микрованне. Наладочные операции, обусловленные технологией литья микропровода капельным способом, снижают производительность труда операторов не только вследствие уменьшения (О), но и из-за повышенной утомляемости оператора, вызванной значительным количеством операций, которые он выполняет в течение смены. Проведенный хронометраж показал, что оператор делает свыше 45 операций по заправке и дозаправке микрованны, свыше 60 операций по подпайке и оттяжке капилляра, почти столько же операций по перехвату капилляра и заброске его в щель, свыше 200 операций по включению и корректировке подачи стекла, центровке капли.

Однако, как показывают исследования, относительно малая производительность капельного способа литья по сравнению с непрерывным, в экономическом отношении более чем в два раза перекрывается дешевизной используемых для капельного процесса стандартных стекол.

В соответствии с проведенными наблюдениями для производства микропровода может быть рекомендована принципиальная технологическая схема рис. 77. За основу предлагаемой схемы технологии массового производства микропровода приняты следующие положения: а) производство микропровода осуществляется при максимальном раз-

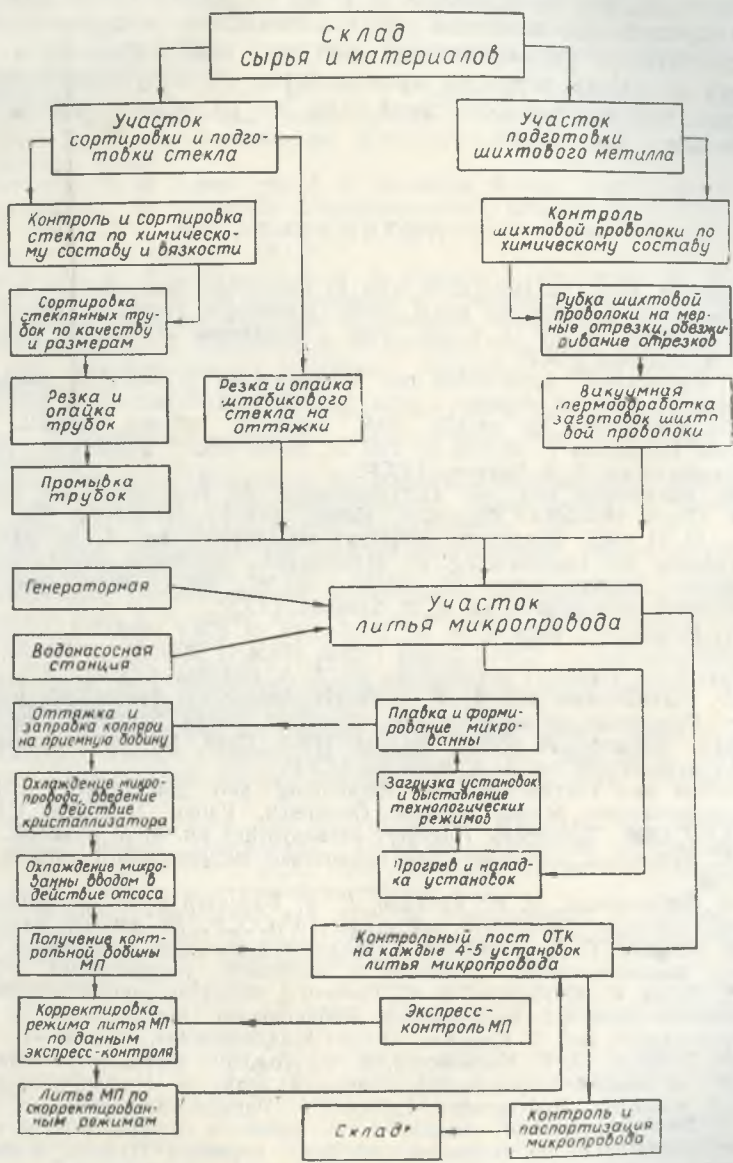


Рис. 77. Схема технологического процесса получения микропровода в условиях массового производства

делении труда по подготовке шихтовых материалов, собственно литья микропровода, его разбраковке и т. д.; б) планируемое для производства микропровода основное технологическое оборудование должно быть достаточно универсальным для его использования в заводских условиях в случае перевода производства на получение микропровода по новой технологической схеме или на их основе новых шихтовых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Installation pour la fabrication d'un fil métallique micrométrique isolé au verre, directement à partir du métal fondu. République Française, Brevet d'invention, № 1361929, int. cl.: C 2, 3d., 1964. Заявитель: Институт металлургии им. А. А. Байкова, СССР.
2. V. N. Parkhachev. Apparecchio per la produzione di microfilo metallico isolato con vetro utile ad esempio nella fabbricazione di strumenti elettrici di vario tipo, direttamente dal metallo fuso. Repubblica Italiana. Brevetto per Invenzione Industriale N 687909, cl. H01 b., 26.III 1965. Заявитель: Институт металлургии им. А. А. Байкова, СССР.
3. V. N. Parkhachev and K. D. Ulitovskaja. An Installation for the Production of Glass Insulated Microwire. Patent Britain N 994 682, int. cl.: C 03b, c., 10. VI 1965. Заявитель: Институт металлургии им. А. А. Байкова, СССР.
4. Anläggning för framställning av glasisolerad mikrotråd direkt, direktav smält metall. Sverige, patent N 203157, int. cl.: H01b., 29.III 1966. Заявитель: Институт металлургии им. А. А. Байкова, СССР.
5. V. N. Parkhachev. Installation for production of glass insulated microwire directly from liquid metal. United States Patent office N 3256584, cl. 29—33, 21.VII 1966. Заявитель: Институт металлургии им. А. А. Байкова, СССР.
6. W. N. Parkhatschew und A. W. Ulitovski. Anlage zur Herstellung von glasisolier-ten Feinstdraht un mittelbar aus flüssigem Metall. Schweizerische Eidgenossen- schaft, Urkunde № 427939, int. cl.: H01b 13/10, 15.I 1967. Заявитель Инсти- тут металлургии им. А. А. Байкова, СССР.
7. Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von glasisolier-ten Feinstdraht aus geschmolzemen Metall. Republik Österreich, Patent N 269790, int. cl.: B 21C., 15.VII 1968. Заявитель: Институт металлургии им. А. А. Байкова, СССР.
8. М. Г. Лозинский. Промышленное применение индукционного нагрева. АН СССР, 1958.
9. В. И. Заборовский, Н. Н. Архипов, Е. Я. Бадинтер и др. Установка для литья микропровода. Авторское свидетельство СССР, № 240797, класс 21с, 7/03.
10. А. В. Бамунэр, Б. А. Катанский. Стабилизатор анодного напряжения типа САН-57 для высокочастотных установок с ламповыми генераторами, ЛДНТП, 1958.
11. С. К. Зотов, О. Б. Клецко, Э. С. Радченко. Фотоэлектронный микрометр для измерения диаметра движущегося микропровода. Микропровод и приборы со- противления, вып. 2. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1964, 67—75.
12. А. Ф. Зимодро, Л. Т. Ключевский, Е. Ф. Ломакин. Фотоэлектрический микрометр EI-1 и анализ погрешностей измерения диаметра микропроводов в стеклян- ной изоляции. Электронная техника, 9. Радиокомпоненты, вып. 1. М., 1967.
13. V. I. Zaborovskiy, O. A. Ivanov, A. N. Savenkov. Apparecchio per la colata di un microfilo in un isolamento di vetro. Repubblica Italiana, Brevetto per In- venzione Industriale N 765291, 15.III 1967. Заявитель: Кишиневский научно-ис- следовательский электротехнический институт, СССР.
14. V. I. Zaborovskiy, O. A. Ivanov et A. N. Savenkov. Dispositif pour la coulée de microconducteurs électriques avec isolation de verre. République Française.

- Brevet d'invention N 1481607, Cl. int.: HO1b, 19.V 1967. Заявитель: Кишиневский научно-исследовательский электротехнический институт, СССР.
15. V. *I. Zaborovsky, O. A. Ivanov* und *A. N. Savenkov* in Kishinew. Vorrichtung zum Haardrahtgießen in Glasisolation. Republik Österreich, Patent N 270776, int. cl.: HO1b, 12.V 1969. Заявитель: Кишиневский научно-исследовательский электротехнический институт, СССР.
 16. V. *I. Zaborovsky, O. A. Ivanov* and *A. N. Savenkov*. Apparatus for casting a microwire in glass insulation. Patent Britain, N 1157313, int. cl.: GO5 f 1/00, 9.VI 1969. Заявитель: Кишиневский научно-исследовательский электротехнический институт, СССР.
 17. V. *I. Zaborovsky, O. A. Ivanov* und *A. N. Savenkov*. Anlage zum Haardrahtgießen in Glasisolation. Schweizerische Eidgenossenschaft, Urkunde N 471616, int. cl.: B 22d 11/02, 13.VI 1969. Заявитель: Кишиневский научно-исследовательский электротехнический институт, СССР.
 18. *A. С. Гольштейн, В. И. Заборовский, О. А. Иванов, З. В. Литвак, А. М. Марютин*. Установка для литья микропровода в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 5. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1968.
 19. *В. И. Заборовский, Е. Я. Бадинтер, З. И. Зеликовский, А. М. Марютин*. Устройство для высокочастотного нагрева. Авторское свидетельство СССР, № 178720, классы 21, 18₃₀, 21, 29₀₃.
 20. *В. И. Заборовский, А. М. Марютин*. Многопостовые установки для литья микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 2. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1964.
 21. *В. И. Заборовский, О. А. Иванов, А. М. Марютин*. Дистанционное питание высокочастотных установок литья микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 3. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965.
 22. *В. И. Заборовский*. Устройство для намотки микропровода. Авторское свидетельство СССР, № 288147, класс 21, 1/01.
 23. *В. И. Заборовский*. Автомат приема микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 3. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965.
 24. V. *I. Zaborovsky*. Dispositivo per l'avvolgimento di microfilì nel corso della fabbricazione degli stessi. Repubblica Italiana, Brevetto per Invenzione Industriale N 857177, 16.II, 1970. Заявитель: Кишиневский научно-исследовательский институт электроприборостроения, СССР.
 25. V. *I. Zaborovsky*. Anordning för lindning av tunn tråd under loppet av trädens framställning. Sverige. Patent N 324269, int. cl.: B65 54/44, 25.V 1970. Заявитель: Кишиневский научно-исследовательский институт электроприборостроения, СССР.
 26. V. *I. Zaborovsky*. Vorrichtung zum Aufwickeln von Haardraht bei dessen Erzeugung. Bundesrepublik Deutschland. Deutsches Patentamt Offenlegungsschrift 1917344, int. cl.: B65h HO1f, 22.X, 1970. Заявитель: Кишиневский научно-исследовательский институт электроприборостроения, СССР.
 27. *В. И. Заборовский*. Устройство для намотки микропровода в процессе литья. Франция, патент № 2050674, 23.III 1971 г. Заявитель: Кишиневский научно-исследовательский институт электроприборостроения, СССР.
 28. *В. И. Заборовский*. Устройство для намотки микропровода в процессе литья. США, патент от 3.XII 1970. Заявитель: Кишиневский научно-исследовательский институт электроприборостроения, СССР.
 29. *В. И. Заборовский*. Устройство для намотки микропровода в процессе литья. Индия, патент № 121588 19.IX 1970. Заявитель: Кишиневский научно-исследовательский институт электроприборостроения, СССР.
 30. *В. И. Заборовский, З. В. Литвак, Е. З. Шаниро*. Контроль объема металла в процессе литья микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 5. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1968.
 31. *Л. Э. Дегтярь, З. И. Зеликовский, В. П. Цетенс*. Измерение погонного сопротивления микропровода в процессе литья. Микропровод и приборы сопротивления, вып. I. Кишинев, «Штинца», 1962.

32. В. И. Заборовский, З. В. Литвак, Е. З. Шапиро. О возможности повышения точности измерения погонного сопротивления микропровода в процессе литья. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 4. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966.
33. Е. Я. Бадинтер. Литье микропровода из сплавов сопротивления. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 3. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965, 3—15.
34. Е. Я. Бадинтер, Ф. А. Баргаш, С. К. Зотов, Р. В. Яшманова. Технология литья и свойства микропровода из сплавов Н60ГХ и Н63ГХ. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 2. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1964, 27—40.
35. А. М. Марютин. О сокращении времени наладки процесса при литье микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 3. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965, 63—66.
36. В. И. Заборовский, С. К. Зотов, В. М. Тарасенко. О зависимости параметров манганинового микропровода в стеклянной изоляции от скорости литья. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 3. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965, 67—72.
37. В. Н. Пархачев, В. Ф. Саишков, В. А. Шпирнов. Производство литой микропровода в стеклянной изоляции. М., ГОСИНТИ, 1963.
38. Микрометаллургия и микротехнология. Под редакцией проф. Б. А. Остроумова, Л., ЦБТИ, 1959.
39. В. И. Заборовский, С. К. Зотов, Л. П. Менчиков. О существующих предпосылках регулирования параметров микропровода в процессе литья. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 4. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 52—61.
40. Е. Я. Бадинтер, В. И. Заборовский, С. К. Зотов, А. М. Марютин. О согласовании размеров индуктора и используемых стеклянных трубок при литье микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 4. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 87—90.
41. Г. М. Гольдинер, В. И. Заборовский, С. К. Зотов. Зависимость толщины стеклянной изоляции микропровода от некоторых условий литья. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 4. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 91—93.
42. В. П. Матвеев. Некоторые закономерности формирования параметров микропровода в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 5. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 19—23.
43. В. Ф. Солинов. Роль вязкости стекла при получении микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 55—57.
44. Э. А. Альфтан, С. В. Деянова. Микропровода МЛСК40, МЛСК37, МЛСК80 и МЛСК60. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 78—90.
45. В. С. Меськин, Э. А. Альфтан, С. В. Деянова. Микропровода из сплавов типа константан. Вопросы радиоэлектроники, серия III. Детали и компоненты аппаратуры, вып. 10, 1964, 103—111.
46. А. М. Марютин. О непрерывном процессе литья манганинового микропровода в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VI. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1969, 23—28.
47. Э. А. Альфтан. Литье микропровода в стеклянной изоляции из сплавов сопротивления. Вопросы радиоэлектроники, серия III. Детали и компоненты аппаратуры, вып. 10, 1964, 11—17.
48. В. В. Трояновский. Развитие метода изготовления сверхтонких проволок непосредственно из жидкого металла. Достижения в области разработки, производства и применения микропровода в стеклянной изоляции. М., ЦИНТИ Электропром, 1962, 7—14.

49. Л. Г. Афонина, А. М. Фирсов, Э. А. Альфтан, Н. Я. Карасик, С. В. Деянова. Никелевые сплавы для литых микропроводов повышенной технологичности. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VI. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1969, 109—114.
50. М. Е. Белоус. Исследование возможности улучшения качества и усовершенствования технологии литья медных микропроводов. Электронная техника, серия 9. Радиокomпоненты, вып. 2, 1968, 98—107.
51. В. П. Матвеев. О процессе получения микропроводов в стеклянной изоляции непосредственно из жидкого металла. Достижения в области разработки, производства и применения микропроводов в стеклянной изоляции. М., ЦИНТИ Электропром, 1962, 14—40.
52. Л. Г. Афонина, Е. В. Витлина, С. В. Деянова, Н. Я. Карасик, Г. А. Понятов, Б. В. Фармаковский, А. М. Фирсов. Непрерывный процесс литья микропровода из резистивных сплавов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VII. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1971, 3—11.
53. Б. В. Фармаковский, С. В. Деянова. Некоторые особенности кристаллизации и термобработки литых микропроводов из сплавов сопротивления. Электронная техника, серия 9. Радиокomпоненты, вып. 2, 1968, 48—60.
54. Б. И. Симаков, В. С. Тюньков. Режимы литья низкоомных микропроводов из хромоникелевых сплавов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VII. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1971, 11—14.
55. С. В. Деянова, Э. А. Альфтан, Е. В. Шувалов, А. М. Фирсов. Технология изготовления микропроводов МЛСК37, МЛСК40, МЛСК80, МЛСМ60 и их характеристики. Электронная техника, серия 9. Радиокomпоненты, вып. 1, 1967, 27—40.
56. М. Е. Белоус, В. К. Бояришинов. О некотором усовершенствовании капельного процесса литья микропроводов. Электронная техника, серия 9. Радиокomпоненты, вып. 1, 1970, 90—101.
57. С. П. Обидина, М. Ф. Денисова. Исследование возможности применения некоторых стекол для литых микропроводов. Вопросы радиоэлектроники, серия III. Детали, компоненты аппаратуры, вып. 10, 1964, 45—52.
58. В. С. Пяткин. Исследование непрерывного стеклянного волокна в зоне формирования. Научно-исследовательские труды ВНИИСВ, вып. 6, 1959, 15—27.
59. А. М. Фирсов, Е. И. Федотова. Поверхностные явления в системе металл—стекло. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VI. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1969, 64—71.
60. Л. Г. Афонина, В. И. Вахрамеев, С. В. Деянова, Б. В. Фармаковский, А. М. Фирсов. Свойства исходных материалов для литья терморезистивных микропроводов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VII. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1971, 14—22.
61. В. З. Шуб, В. И. Лукьянов. Некоторые особенности изготовления тончайших металлических нитей из никельхромовых расплавов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1966, 62—71.
62. А. М. Фирсов. Влияние межфазного натяжения на литье микропроводов. Вопросы радиоэлектроники, серия Детали и компоненты аппаратуры, вып. 10, 1964, 73—82.
63. Г. Г. Карасева, В. И. Вахрамеев, Б. В. Фармаковский. Кристаллизационная способность стекол, применяемых для литья микропроводов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VII. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1971, 22—29.
64. Н. П. Федотова, Г. Г. Карасева, Б. В. Фармаковский, А. М. Фирсов, Н. П. Шмуилова. Исследование свойств стекломатериалов для литья микропроводов в стеклянной изоляции. Электронная техника, серия Радиокomпоненты, вып. 2, 1968, 60—72.

65. В. В. *Налимов*. Статистические методы исследования химических и металлургических процессов. М., Металлургиздат, 1963.
66. В. И. *Заборовский*, Ю. К. *Покровский*. К вопросу исследования процесса литья медного микропровода капельным способом. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VII. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1971, 17—23.
67. В. В. *Налимов*, Н. А. *Чернова*. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., «Наука», 1965.
68. Е. Я. *Бадинтер*, И. Г. *Старуш*, Ю. В. *Чугаевский*. Аналитические зависимости между входными и выходными параметрами процесса литья микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966. Кишинев, 16—24.
69. Л. С. *Эйгенсон*. К вопросу о л-теореме. Труды Всесоюзного энергетического института, вып. 8, 1957, 14—20.
70. А. Д. *Гальцев*. Основы технического нормирования труда на промышленном предприятии. М., Госполитиздат, 1965.

СВОЙСТВА ЛИТЫХ МИКРОПРОВОДОВ В СТЕКЛЯННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

ГЛАВА V

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИКРОПРОВОДА

Высокая скорость кристаллизации и микронные размеры микропровода обуславливают характер его механических свойств. В микропроводе явно проявляются статистическая природа прочности и так называемые масштабные эффекты, т. е. зависимость прочностных характеристик от поперечных и продольных размеров исследуемого образца. Практика использования микропровода в электроизмерительной технике выдвинула задачи исследования таких его характеристик, как коэффициент тензочувствительности, температурный коэффициент линейного расширения, коэффициент трения микропровода при соприкосновении с различными материалами. Определенный интерес представляет также описание структуры переходного слоя и характера спая между стеклом и металлом в микропроводе. Во всех этих вопросах теория разработана еще недостаточно глубоко, поэтому приводимые результаты в основном являются полумпирическими. Однако это не снижает их практической ценности в инженерных приложениях.

§ 1. Геометрические параметры микропровода

К геометрическим параметрам микропровода относят внешний диаметр изоляции D , диаметр металлической жилы d , одностороннюю толщину изоляции Δ , отношение внешнего диаметра изоляции к диаметру жилы $\frac{D}{d}$ и длину отрезка микропровода на бобине l .

Наиболее полно изучены геометрические параметры медного микропровода, которые нормируются рядом действующих технических условий [1, 2]. В них обычно указываются номинальный ряд диаметров

жилы и допустимые отклонения по нему, максимальный диаметр по изоляции, а также минимальная длина отрезка микропровода с гарантируемыми параметрами. Из табл. 1 видно, что технические условия [1] распространяются на микропровода с $12 \text{ мкм} \leq d \leq 200 \text{ мкм}$. В технические условия [2] внесена группа микропровода с $d=5 \text{ мкм}$. Указанный диаметр не является пределом для медного или для микропроводов из других металлов. Еще в 1960 г. сообщалось об освоении

Таблица 1

Геометрические параметры медного микропровода

Номинальный диаметр жилы, мм	Допустимые отклонения по диаметру жилы, мм	Толщина изоляции, мм (не более)	Диаметр по изоляции, мм (не более)	Минимальная длина микропровода на bobине, м
0,012	$\pm 0,002$	0,006	0,026	600
0,020	$\pm 0,003$	0,006	0,035	600
0,025	$\pm 0,003$	0,007	0,042	600
0,032	$\pm 0,005$	0,009	0,055	600
0,050	$\pm 0,007$	0,011	0,079	600
0,070	$\pm 0,007$	0,012	0,101	500
0,100	$\pm 0,015$	0,020	0,155	300
0,120	$\pm 0,015$	0,024	0,183	300
0,160	$\pm 0,020$	0,025	0,230	200
0,200	$\pm 0,025$	0,027	0,275	150

производства микропровода из золота и ряда сплавов с диаметром от 1 до 20 мкм [3]. Разработана также лабораторная технология получения микропроводов с $d < 1 \text{ мкм}$ из манганина и некоторых других сплавов. Английские фирмы освоили литье медного и манганинового микропровода с $d=1 \text{ мкм}$ [4]. В Японии получены микропровода таких же диаметров из меди, манганина и других металлов [5]. В Советском Союзе накоплен опыт по производству микропровода с диаметром жилы до 1 мкм (из серебра, никеля, платины, палладия, кобальта, олова, свинца, чугуна и других материалов). Однако сегодняшний уровень производства не позволяет уверенно нормировать их свойства.

Хотя для микропровода из сплавов сопротивления принято рассматривать погонное сопротивление r , но иногда возможности процесса литья оценивают и диапазоном d . Установлено, например, что для медно-марганцевых сплавов он находится в пределах 1—30 мкм, никель—медных — 2—30 мкм [6], а для манганинового до 30 мкм [7]. Что касается D , то для каждой группы микропровода с определенным r в технических условиях оговаривается его максимальная величина. Однако при сравнении их по d необходимо учитывать удельное сопротивление материала жилы ρ (табл. 2). Зависимость между диаметром

жилы, ее удельным сопротивлением и погонным сопротивлением микропровода выражается формулой

$$d = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\rho}{r}} \quad (5.1.1)$$

Средняя длина отрезка манганинового микропровода 1000 м, а в отдельных случаях превышает 5000 м. Однако в нормативных документах часто указывается общее сопротивление микропровода на бобине. Толщина изоляции микропроводов из сплавов сопротивления находят-

Таблица 2
Геометрические параметры микропроводов из сплавов сопротивления

Наименование микропровода							
Манганин, $\rho = 0,45$, [8]*, ом·мм ² /м		МЛСН-60 [9], $\rho = 1,1 - 1,2$, ом·мм ² /м		МЛСК-80 [10], $\rho = 1,3 - 1,5$, ом·мм ² /м		МЛСК-40 [10], $\rho = 1,8 - 2,0$, ом·мм ² /м	
r , ком/м	D , мкм	r , ком/м	D , мкм (не более)	r , ком/м	D , мкм (не более)	r , ком/м	D , мкм (не более)
3—5	17—22			5	42	8	30
5—10	14—20	10	24	10	28	16	25
14—20	11—17	20	20	20	23	32	18
20—40	10—16	40	16	40	16	63	12
40—70	10—16	80	14	80	13	125	10
70—150	8—15	160	12	160	9		

* Приведена только часть групп.

ся в пределах 3—7 мкм. Эти границы могут быть расширены и в отдельных случаях получаем микропровод с толщиной изоляции менее 3 мкм и более 7 мкм.

За рубежом за основу классификации микропроводов по геометрическим параметрам взят внешний диаметр изоляции. Эта величина

Таблица 3
Геометрические параметры микропроводов, выпускаемых за рубежом

Материал жилы	D , мкм	d , мкм	l , м
Медь	10—15	5—10	5
Манганин	15—25		
Медь	25—40	1—5	50
Манганин		5—10	100
		10—18	500
Медь	40—60	30—50	5

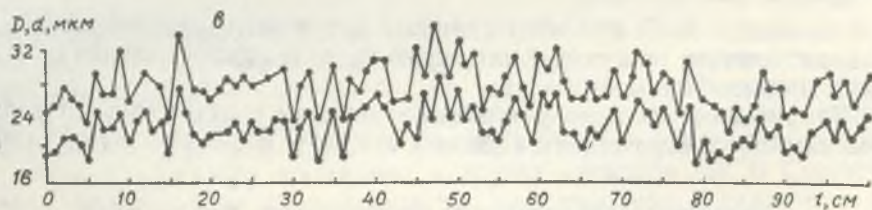
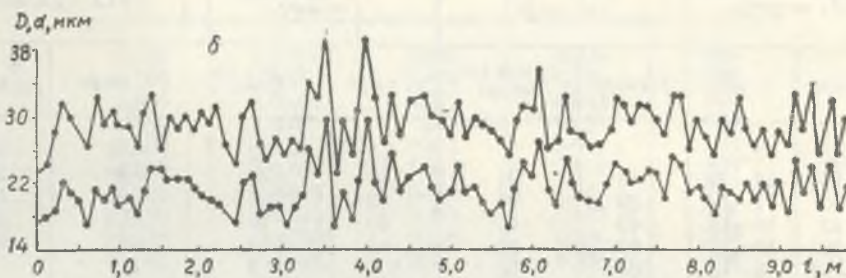
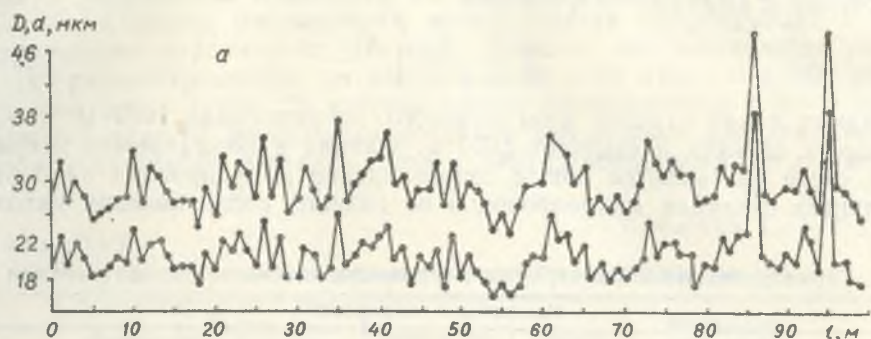


Рис. 78. Характерные колебания поперечных размеров медного микропровода на длине (м):

$a - 100$; $б - 10$; $в - 1$; $г - 0,1$

используется для характеристики микропровода из различных металлов и сплавов сопротивления (табл. 3 [11]). Поперечное сечение жилы микропровода близко к круглому [12]. Исследований по эксцентриситету жилы микропровода не проводилось. Однако известно, что поперечные размеры микропровода не остаются постоянными вдоль отрезка, а представляют собой случайные функции длины. Эти функции содержат периодические колебания довольно широко спектра с длиной волны порядка от 10 мм до 10 м [13]. На рис. 78 приведены характерные кривые изменения поперечных размеров медного микропровода. Видно, что колебания d и D сильно связаны между собой. В [13] средний коэффициент корреляции между D и d оценивается в 0,92, а максимальный интервал корреляции 30 мм, с другой стороны, в [14] для коэффициента корреляции приводится оценка 0,1—0,2, а корреляционное отношение оценивается в 0,25. Причина имеющихся

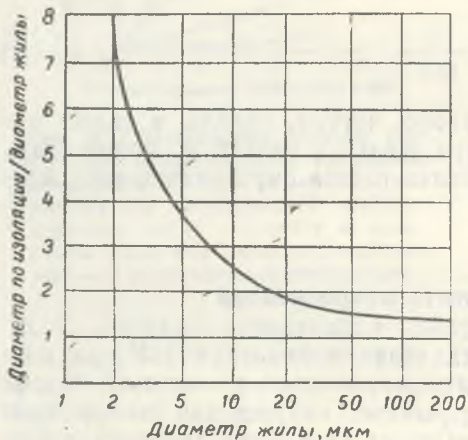


Рис. 79. Зависимость отношения $k = \frac{D}{d}$ от диаметра жилы

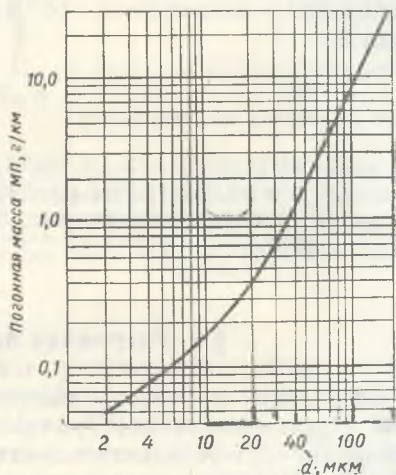


Рис. 80. Зависимость погонного веса микропровода от диаметра жилы

расхождений в этом вопросе до сих пор не выяснена. Но можно допустить, что данные [13] относятся к установившемуся процессу литья микропровода, а данные [14] связаны с неустойчивостью при переходных режимах. Вообще говоря, колебания диаметров жилы и стеклянной изоляции являются, с одной стороны, следствием наличия пузырьков, непроваров стекла, посторонних включений и других нарушений однородности исходных материалов, а с другой стороны, они отражают особенности литья на существующем оборудовании (колебания электрических режимов, биения приемной бобины и т. д.). Большие пики на

рис. 78 могут быть вызваны камнями и шлирами в исходной стеклотрубке [15], а колебания с частотой 300 гц, которая имеет место при скорости получения микропровода 200 м/мин, объясняются пульсациями мощного выпрямителя (схема Ларионова), питающего генератор [13].

Микропровод, выпускаемый за рубежом, отличается большой неравномерностью [16]. Для медного микропровода, изготовляемого в Японии, при $d=10$ мкм на длине порядка 100 м колебания d находятся в пределах 4—5 мкм, а для выпускаемого в Англии марганцевого микропровода с диаметром жилы 10 мкм колебания поперечных размеров достигают 6 мкм для d и 8 мкм для D .

Для микропровода можно также рассматривать отношение внешнего диаметра изоляции к диаметру жилы $k = \frac{D}{d}$. Максимальное значение этого отношения для установившегося процесса литья в пределах от 1,3 до 8 и возрастает с уменьшением диаметра жилы (рис. 79). Приведенная зависимость ($3 \text{ мкм} \leq d \leq 160 \text{ мкм}$) аппроксимируется формулой

$$k_{\max} = \frac{2,5}{\lg d} \quad (5.1.2)$$

Вес 1 км микропровода из меди, серебра, чугуна, никеля, а также ряда сплавов в зависимости от диаметра жилы, с учетом k , может быть определен приблизительно по рис. 80. Более точное определение веса приведено в [17].

§ 2. Разрывная прочность микропровода

Разрывная прочность оценивается величиной нагрузки P при разрыве. Однако сравнение прочности микропроводов различных марок производят путем сопоставления разрывных напряжений в изоляции и жиле. Обычно пределы прочности на разрыв металлической жилы $\sigma_{жв}$ и стеклянной изоляции $\sigma_{ов}$ вычисляют по известным формулам теории упругости

$$\sigma_{жв} = \frac{P}{E_{\text{экв}}} E_{ж}, \quad \sigma_{ов} = \frac{P}{E_{\text{экв}}} E_{\text{ст}}, \quad (5.2.1)$$

где $E_{\text{экв}} = E_{ж} S_{ж} + E_{\text{ст}} S_{\text{ст}}$ — эквивалентный модуль Юнга двухкомпонентной системы металл—стекло, $E_{ж}$, $E_{\text{ст}}$, $S_{ж}$, $S_{\text{ст}}$ — модули Юнга и площади поперечного сечения жилы и стеклянной изоляции.

Использование формул (5.2.1) требует специального обоснования, так как они предполагают, что материалы жилы и изоляции вплоть до разрыва ведут себя идеально упруго. В отношении изоляции это предположение можно оправдать результатами исследований дефор-

мации стекловолокна [18, 19]. Что касается металлической жилы и микропровода в целом, то возможность расчета пределов прочности из условий упругой деформации до разрыва подтверждается серией кривых зависимости осевого усилия от относительного удлинения, которая получена при исследовании диаграмм растяжения на образцах микропровода базой 25 мм с жилой из сплава на никелевой основе (рис. 81).

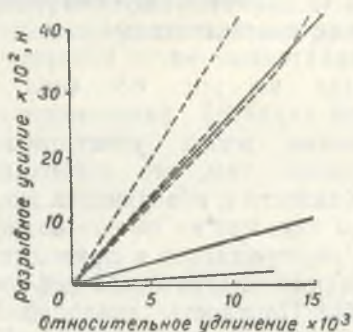


Рис. 81. Зависимость осевого усилия от относительного удлинения, измеряемого на базе 25 мм при растяжении со скоростью 55 мм/мин. Сплошные линии относятся к испытаниям жилы без изоляции, пунктирные — к испытаниям микропровода

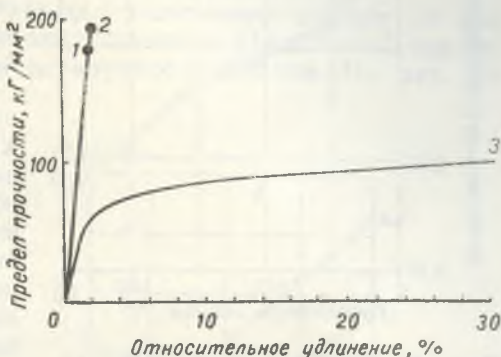


Рис. 82. Графики зависимости растягивающего напряжения от относительного удлинения для сплава Н60ГХ: 1 — жила без изоляции, $d=8$ мкм; 2 — жила без изоляции, $d=13$ мкм; 3 — проволока диаметра 5,35 мм

В. С. Ленский, сопоставляя диаграммы растяжения микропровода из сплава Н60ГХ без изоляции с диаграммой растяжения прутка диаметром 5,35 мм из такого же материала (рис. 82), показывает, что характер кривых зависит от их геометрических параметров [20]. Для жилы микропровода линейная зависимость сохраняется вплоть до разрыва, при этом относительное удлинение достигает 1,5—1,8%, в то время как разрушению проволоки предшествует пластическая деформация порядка 30%. Напряжение при разрыве составляет 180 кг/мм^2 при $d=8$ мкм и 10 кг/мм^2 при $d=5,35$ мм. Предел прочности проволок диаметром 1,15 и 1,35 мм ($0,4 \text{ кн/мм}^2$) в 2,5 раза меньше расчетного предела прочности для жилы из манганина диаметром 4 мкм [20]. Следует отметить, что, в отличие от жилы сплавов сопротивления на никелевой основе, разрушению жил из меди и манганина предшествует пластическая деформация, которая по единичным испытаниям соответственно составляет 4,5% ($d=13$ мкм) и 2% ($d=11,4$ мкм). В такой ситуации в пользу применения формул (5.2.1) можно привести следующее соображение. Начало пластической деформации в жиле имеет следствием такое перераспределение напряжений между жилой и изо-

ляцией, при котором с ростом внешней нагрузки возрастают растягивающие напряжения только в стеклянной изоляции. Поэтому при определенном соотношении поперечных размеров жилы и изоляции стеклянная изоляция разрушится уже при незначительном увеличении растягивающего усилия. А это автоматически приведет к обрыву жилы. Так что и в рассматриваемом случае есть основания полагать, что формулы (5.2.1) дадут допустимое приближение к действительности.

Характерные виды разрушения показаны на рис. 83. (вкл. 2). Хрупкий характер разрушения при растяжении жилы микропровода объясняется тем, что дислокации, ввиду близости к поверхности жилы, связаны так, что не имеют возможности перемещаться и приводить к образованию пластической деформации [20]. Плотность дислокаций в германиевом микропроводе ($d=50-100$ мкм) на плоскости [111] оказалась равной примерно $3 \cdot 10^{-6}$ см [21]. Для чистых металлов относительное удлинение линейно возрастает (с увеличением нагрузки) до момента хрупкого разрушения микропровода. Тепловое воздействие на микропровод охрупчивает его (рис. 84), что является следствием снятия остаточных сжимающих усилий в стеклянной пленке изоляции в процессе отжига [22].

Исследование зависимости приложенной нагрузки от относительного удлинения для микропроводов из ряда сплавов сопротивления было проведено в [23]. В этой работе показано, что для микропрово-

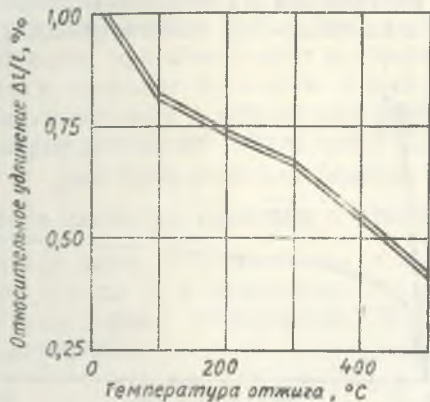


Рис. 84. Изменение относительного удлинения литых микропроводов из селенбра при различных температурах отжига [22]

дательное удлинение линейно возрастает (с увеличением нагрузки) до момента хрупкого разрушения микропровода. Тепловое воздействие на микропровод охрупчивает его (рис. 84), что является следствием снятия остаточных сжимающих усилий в стеклянной пленке изоляции в процессе отжига [22].

Исследование зависимости приложенной нагрузки от относительного удлинения для микропроводов из ряда сплавов сопротивления было проведено в [23]. В этой работе показано, что для микропрово-

Таблица 4

Модули упругости материалов жилы и стеклоизоляции микропроводов

Материал	Диаметр жилы d , мкм	Относительное удлинение, %	Модуль упругости E , кг/мм ²	
			Определенный экспериментально	Рассчитанный (табличный)
Жила провода МЛСК-40	12	0,7	19800	20490
Жила провода МЛСК-37	16	0,3	21000	20500
Жила провода МЛСК-60	23	0,1	14350	14760
Стекловолокно из пирекса	25	0,87	5880	6050

дов марок МЛСК-40 (из сплава К40ГХ), МЛСК-80 (из сплава К80ГС) и МЛСК-37 (из сплава К37ХГ) деформация вплоть до разрыва носит чисто упругий характер. В то же время некоторые кривые имеют излом, что говорит о наличии пластической деформации. В [23] для этих микропроводов определены модули Юнга (табл. 4). Из табл. 4 видно, что между измеренными и вычисленными, или взятыми из литературы, значениями модулей Юнга нет существенной разницы.

Разрывная прочность микропровода существенно зависит от его геометрических размеров и от условий испытания [14, 24—26], увеличиваясь с уменьшением размеров испытуемого образца. На рис. 85

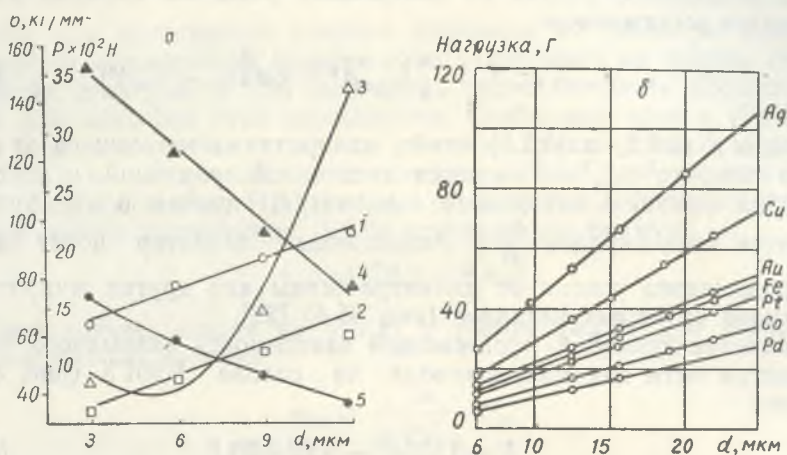


Рис. 85. Зависимость прочности микропровода от диаметра жилы: а — жила из сплавов сопротивления ($\Delta=6$ мкм); б — жила из чистых металлов

показана зависимость разрывного усилия микропроводов из сплавов сопротивления от диаметра металлической жилы d при неизменной толщине стеклянной оболочки ($\Delta=6$ мкм). Скорость нагружения v_{II} равнялась 10 мм/мин. Оказывается, что в практически интересном интервале изменения d разрывное усилие P микропроводов из манганина и сплава «М» на никелевой основе линейно возрастает с ростом внутреннего диаметра (прямые 1 и 2). Аналитические уравнения этих прямых, полученные путем обработки данных по методу наименьших квадратов, выражаются формулами

$$P=0,857d+11,5 \quad (\text{для манганина}), \quad (5.2.2)$$

$$P=0,92d+3,65 \quad (\text{для сплава типа «М»}). \quad (5.2.3)$$

Здесь, как и в дальнейшем, P в Г, а d — в мкм. Справедливость уравнений (5.2.2) и (5.2.3) ограничена сверху величинами внутреннего диа-

метра порядка 15 мкм. При диаметрах жилы, меньших 3 мкм, ход зависимостей (5.2.2) и (5.2.3) также, по-видимому, отклоняется от прямолинейного. И вот почему. При $d \rightarrow 0$ следует ожидать, что предельное растягивающее усилие P стремится к величине разрывной прочности стеклянного волокна соответствующих размеров (прочность стеклянного волокна диаметром 12 мкм [19] лежит в пределах 17—18 Г).

Отметим, что полученные соотношения указывают на существование масштабного эффекта первого рода, т. е. влияние диаметра металлической жилы на прочность образца. Действительно, при отсутствии такого влияния в приближении линейной теории упругости зависимость разрывного усилия от поперечных размеров образца должна описываться выражением

$$P = \sigma_{жв} S_{ж} + \sigma_{ов} S_0 = \frac{\pi}{4} (\sigma_{жв} d^2 + 2 d \Delta \sigma_{ов} + \sigma_{ов} \Delta^2). \quad (5.2.4)$$

Отсутствие в (5.2.2) и (5.2.3) члена, квадратично зависящего от d , говорит о том, что $\sigma_{жв}$ не является постоянной величиной, а представляет собой функцию внутреннего диаметра, причем в эту функцию включается член порядка $\frac{1}{d^2}$. Аналогичный характер носят зависимости разрывного усилия от диаметра жилы для других микропроводов с жилой из чистых металлов (рис. 85 б) [22].

Уравнение кривой 3, отражающей зависимость разрывного усилия от диаметра нити для микропровода из сплава Н60ГХ (рис. 85 а), имеет вид

$$P = 0,525d^2 - 5,2d + 20,1. \quad (5.2.5)$$

Для того чтобы уравнение (5.2.5) описывало прочность вне области масштабного эффекта, необходимо в соответствии с (5.2.4) выполнить, по крайней мере, условие $\frac{b}{2\Delta} = \frac{c}{\Delta^2}$, где b и c — второй и третий коэффициенты в (5.2.5). Разные знаки b и c позволяют утверждать, что и в этом случае наблюдается зависимость предела прочности от диаметра d . Однако сплав Н60ГХ, отличающийся от рассмотренных сплавов целым рядом физико-химических свойств, прежде всего повышенной хрупкостью, имеет область линейной зависимости $P=f(d)$, сдвинутой в сторону малых диаметров. Это означает, что степень проявления масштабного фактора, а также границы его проявления, определяются свойствами исходных материалов.

В [18, 27, 28] показано, что связь между пределом прочности нити и ее диаметром носит гиперболический характер и может быть выражена эмпирической формулой

$$\sigma_{в} = a + \frac{b}{d}, \quad (5.2.6)$$

где a и b — постоянные коэффициенты, зависящие от состава нити и условий ее формирования. Однако формула (5.2.6) не является универсальной и ее применение в области достаточно малых d ограничена хотя бы вследствие того, что $\sigma_{\text{в}} \rightarrow \infty$ при $d \rightarrow 0$. В нашем случае кривые 4 и 5, описывающие разрывные напряжения в стекле и металле манганинового микропровода, также могут быть аппроксимированы формулами типа (5.2.6). Но для стекла более точное приближение дает формула

$$\sigma_{\text{ов}} = -\frac{640,0}{d^2} + \frac{409,0}{d} + 9. \quad (5.2.7)$$

Отметим, что зависимость предела прочности от диаметра (5.2.7) отличается от аналогичной зависимости, полученной на тонких стеклянных нитях, хотя уже в [19] отмечается недостаточность формулы типа (5.2.6) для описания этой зависимости. Свободный член в (5.2.7) есть не что иное как предел прочности обычного стекла данной марки (нонекс). Найденная для него величина $\sigma_{\text{ов}} = 9$ кГ/мм² хорошо согласуется с известными из [18] данными. Для металла также практически удобнее вместо соотношения (5.2.6) использовать формулу

$$\sigma_{\text{жв}} = 178,0 - 8,6 d. \quad (5.2.8)$$

В общем случае, исходя из (5.2.1) с учетом (5.2.4) для зависимости (5.2.2) при $d \rightarrow 0$, получим

$$\sigma_{\text{жв}} = \frac{46}{\pi \Delta^2 E_{\text{ст}}} E_{\text{ж}}. \quad (5.2.9)$$

Если учесть, что $E_{\text{ж}} = (2 - 2,5) G$, где G — модуль сдвига, то из (5.2.9) получим $\sigma_{\text{жв}} \approx \frac{G}{6} \div \frac{G}{7,5}$. Этот результат находится в удовлетворительном согласии с пределом теоретической прочности, который различные авторы полагают равными $\frac{G}{2\pi} \div \frac{G}{30}$. Такой же результат получается и для $\sigma_{\text{ов}}$. При $\Delta \rightarrow 0$ из (5.2.1) и (5.2.2) получается двучленная формула типа

$$\sigma_{\text{жв}} = \frac{a}{d} + \frac{b}{d^2}, \quad (5.2.10)$$

где первый член отражает влияние поверхностных факторов на предел прочности металлической нити, а второй — роль объемных факторов. Легко видеть, что с уменьшением диаметра роль объемных факторов может быть также весьма значительна. Точка, в которой оба члена формулы становятся равными, является в некотором смысле критической. Для всех точек, лежащих справа от нее, влияние поверхностных факторов на прочность превалирует над влиянием объемных; для

точек, лежащих слева от критической — наоборот. В самой критической точке оба типа факторов равноценны.

Другим проявлением роли состояния поверхности является зависимость прочности от толщины изоляции (рис. 86). При этом разрывное усилие (кривая 1) линейно растет с увеличением толщины изоляции при неизменном диаметре жилы ($d=6$ мкм, $v_n=10$ мм/мин)

$$P=2,33\Delta+1, \quad (5.2.11)$$

отсюда в соответствии с (5.2.4) непосредственно получаем, что $\sigma_{ов}$ является функцией Δ .

Из рис. 86 видно, что, начиная с определенной толщины оболочки, заметного изменения пределов прочности не наблюдается. Резкое увеличение прочности в области малых толщин изоляции объясняется, по

видимому, тем, что при литье микропровода с достаточно тонким слоем стекла микро неоднородности стекломассы не сказываются на геометрии поверхности жилы и оболочки, а инородные включения не попадают в микропровод, вследствие чего он получается более совершенным и, следовательно, более прочным. Из сказанного вытекает, что в условиях имеющейся технологии характерный размер особо опасных включений и неоднородностей лежит в пределах 6—7 мкм.

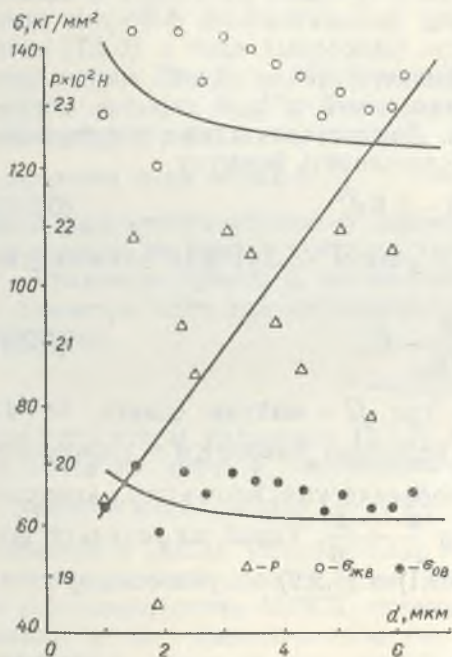


Рис. 86. Зависимость прочности манганинового микропровода от толщины изоляции при $d=6$ мкм:

1 — разрывное усилие; 2 — разрывное напряжение изоляции; 3 — разрывное напряжение жилы

Приведенные данные являются усредненными по большому количеству бобин, так что не отражают дифференциального влияния ни технологических, ни структурных особенностей микропровода. Между тем известно [29, 30], что структура микропровода меняется как в зависимости от размеров, так и в зависимости от различных неконтролируемых условий литья. Металлическая жила может быть и монокристаллической, и поликристаллической. Поэтому при измерениях прочности разброс отдельных значений разрывного усилия большой среднеквадратическое отклонение составляет 15—20%. Нередко встре-

чаются образцы с особо высокой или особо низкой прочностью. Некоторые интересные случаи приведены в табл. 5.

Прочность микропровода является статистической величиной,

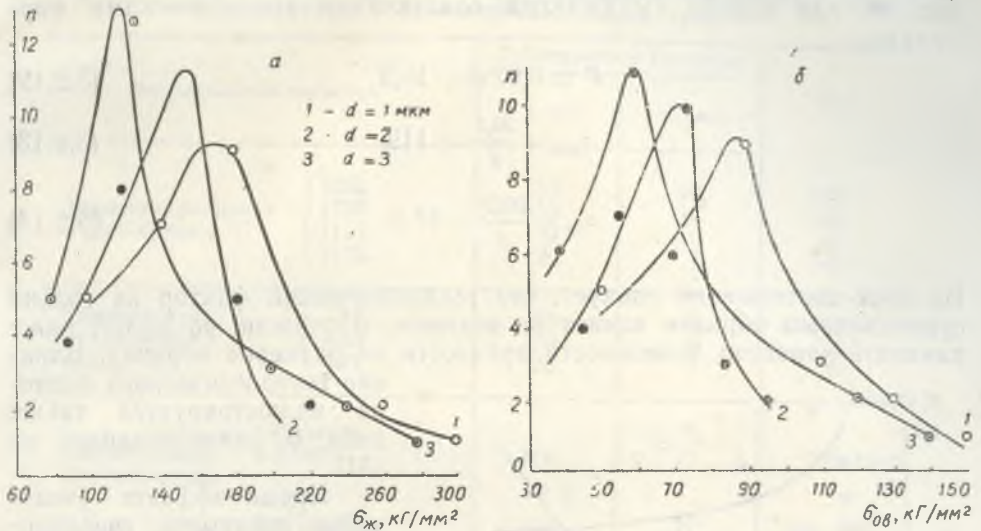


Рис. 87. Кривые распределения прочности жилы (а) и изоляции (б) марганцевого микропровода

вследствие чего ее полная характеристика дается кривой распределения. На рис. 87 показаны кривые распределения прочности жилы и оболочки марганцевого микропровода.

Таблица 5

Некоторые значения прочности марганцевого микропровода

d , мкм	D , мкм	P , Г	$\sigma_{жв}$, кг/мм ²	$\sigma_{об}$, кг/мм ²	d , мкм	D , мкм	P , Г	$\sigma_{жв}$, кг/мм ²	$\sigma_{об}$, кг/мм ²
0,4	17,6	29,75	254,5	122,2	1,0	20,0	29,57	195,5	93,9
0,6	18,2	24,39	195,1	93,7	1,2	18,0	26,42	215,4	103,4
0,8	18,0	27,22	222,4	106,8	1,2	19,2	22,75	160,8	78,3
0,8	18,0	34,67	283,3	136,0	1,2	19,2	28,37	103,4	97,6
0,8	18,2	26,32	210,1	101,1	1,2	19,6	20,67	142,0	68,3
0,8	18,2	29,0	233,6	112,2	1,4	18,4	25,37	197,6	94,9
0,8	18,6	25,95	198,65	95,36	1,4	19,0	11,9	86,9	42,8
0,8	18,9	18,6	133,8	64,3	1,4	19,6	27,22	187,0	89,9
0,8	19,2	28,5	205,4	98,6	1,6	18,0	25,62	208,1	99,9
0,8	19,4	21,32	150,0	72,0	1,6	22,6	27,82	143,75	69,0
1,0	18,0	35,12	271,1	130,1	1,8	20,6	10,52	65,24	31,3
1,0	18,0	29,0	223,8	107,5	2,0	16,0	8,37	85,32	40,96
1,0	18,4	33,92	265,0	127,2	2,0	16,6	27,27	258,5	124,11
1,0	19,0	21,59	158,2	76,0	2,0	17,0	8,77	79,3	38,1
1,0	19,0	25,42	186,3	89,4	2,0	20,2	34,27	220,5	105,9
1,0	19,2	35,75	256,6	123,2	2,2	20,6	35,48	248,2	119,2
1,0	19,4	26,87	188,8	90,7	3,0	15,2	25,27	367,7	176,6

Особый интерес в связи со сказанным представляет изучение зависимости прочности от диаметра для микропровода одной бобины. Одна из наиболее характерных зависимостей такого рода приведена на рис. 88, где кривые выражаются следующими аналитическими формулами:

$$P = 0,67 d + 18,9, \quad (5.2.12)$$

$$\sigma_{жв} = \frac{20,7}{d} + 119, \quad (5.2.13)$$

$$\sigma_{ов} = \frac{10,2}{d} + 57,5. \quad (5.2.14)$$

Из этих соотношений следует, что технологический фактор не только существенным образом влияет на величину прочности, но может даже изменить характер зависимости прочности от размеров образца. Влияние технологического фактора иллюстрируется также табл. 6, заимствованной из [31].

Кроме эффекта увеличения прочности, связанного с уменьшением диаметра, у микропровода обнаруживается увеличение прочности при уменьшении длины испытываемого отрезка, при этом ошутимое увеличение прочности наблюдается при длинах, меньших 60 мм. Это означает, что на отрезке микропровода такой длины с вероятностью, весьма близкой к единице, можно встретить любой дефект, в том числе особо опасные поверх-

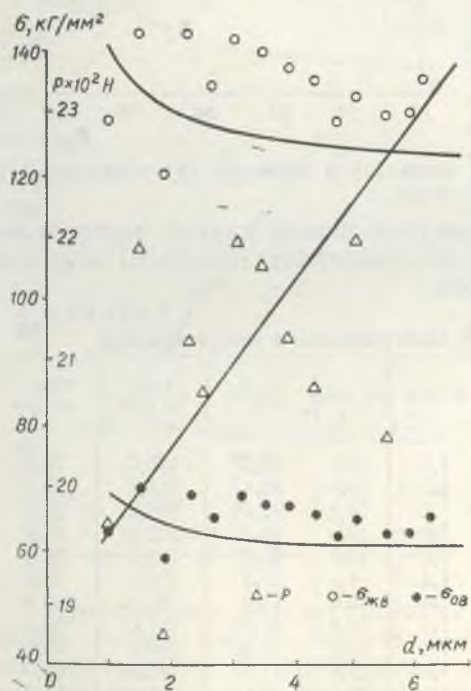


Рис. 88. Зависимость прочности манганинового микропровода от диаметра жилы для микропровода одной бобины

ностные и объемные дефекты, такие как микротрещины, перешейки в жиле и др.

Принято считать, что зависимость прочности от длины может выражаться формулой типа (5.2.6), хотя известно [19], что прямая, вы-

Таблица 6

Механическая прочность медного микропровода, полученного при различных технологических параметрах

Технологические параметры	Геометрические параметры		P, Г	
	d, мкм	Δ, мкм		
Температура капли (яркостная), °С	1025	50	10	140
	1120	50	12	190
	1115	20	6	40
	1175	20	7	40
Температура охлаждающей воды, °С	-14	50	8	100
	+20	50	9	70
	+77	50	7	30
Состав охлаж- дающей среды	эмульсия: t = 20° С	100	17	220
	вода: t = 20° С	100	17	250—300

ражающая зависимость разрывной прочности от обратной длины, меняет угловой коэффициент при длине, близкой к 100 мм. В нашем случае удовлетворительное согласие с экспериментальными данными дают линейные функции:

$$P = 20,2 - 0,105 l, \quad (5.2.15)$$

$$\sigma_{жв} = 147,0 - 0,765 l, \quad (5.2.16)$$

$$\sigma_{ов} = 70,6 - 0,37 l. \quad (5.2.17)$$

В табл. 7, где l взято в мм P — в Г, σ — в $\frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$, приведены разрывные усилия для микропроводов из сплавов сопротивления в зависимости от скорости нагружения (скорости передвижения захватов). Там же даны значения $\sigma_{ов}$ и $\sigma_{жв}$ для марганцевого микропровода. Из табл. 7 видно, что для сплава Н60ГХ и «М» наблюдается незначительное снижение прочности с уменьшением скорости передвижения захватов. Для марганца это уменьшение более значительно. Видимо это связано с тем, что марганец является более пластичным материалом по сравнению со сплавом Н60ГХ и сплавом «М». Вообще же, рассматриваемое уменьшение прочности иллюстрирует влияние накапливаемых статистических повреждений, а также проявление вязкой природы стеклянной оболочки.

Таблица 7

Зависимость разрывного усилия и предела прочности от скорости нагружения ($d = 6$ мкм, $\Delta = 6$ мкм, $l = 25$ мкм)

v , мм/мин	Манганин P, Γ	Н60ГХ P, Γ	Спецсплав P, Γ	$\sigma_{жв}$, кг/мм ²	$\sigma_{об}$, кг/мм ²
1	10,1	9,1	7,1	73,8	35,5
5	17,1	9,8	7,6	125	60,0
10	17,1	9,4	9,7	125	60,0

Общая зависимость разрывного усилия микропровода от его геометрических параметров исследовалась в [23, 24]. В [24] для этой зависимости предложена эмпирическая формула

$$P = ad^2 + b\Delta - c, \quad (5.2.18)$$

где a, b, c — постоянные коэффициенты, которые, например, для манганинового микропровода соответственно равны 0,06; 1,0 и 2,5, а для МЛСН60 — 0,1; 1,1 и 2. Оттуда же взяты приводимые в табл. 8 формулы для расчета разрывного усилия и пределов прочности жилы и стеклянной изоляции микропровода из ряда материалов. В [23] пред-

Таблица 8

Формулы расчета разрывного усилия и пределов прочности жилы и стеклянной изоляции микропровода

Материал		k	Разрывное усилие $10^{-3}, P, \Gamma$	Предел прочности, кг/мм ²	
изоляция	жила			$\sigma_{ж}$	$\sigma_{ст}$
Нонекс	Манганин	2,1	$(42,5 + D - 4d)(D^2 + 1,1d^2)$	$\frac{2,1P}{2,1S_{ж} + S_{ст}}$	$\frac{P}{2,1S_{ж} + S_{ст}}$
Нонекс	Медь	2,0	$(42,5 + D - 4d)(D^2 + d^2)$	$\frac{2P}{2S_{ж} + S_{ст}}$	$\frac{P}{2S_{ж} + S_{ст}}$
Нонекс	Серебро	1,3	$(42,5 + D - 4d)(D^2 + 0,3d^2)$	$\frac{1,3P}{1,3S_{ж} + S_{ст}}$	$\frac{P}{1,3S_{ж} + S_{ст}}$
ЗС-11	Манганин	1,8	$(51,5 - 1,8d^2)(D^2 + 0,8d^2)$	$\frac{1,8P}{1,8S_{ж} + S_{ст}}$	$\frac{P}{1,8S_{ж} + S_{ст}}$
Ф-1	Манганин	1,9	$(48,0 - 1,7d^2)(D^2 + 0,9d^2)$	$\frac{1,9P}{1,9S_{ж} + S_{ст}}$	$\frac{P}{1,9S_{ж} + S_{ст}}$

лагают эмпирическую зависимость $P = f(d, D)$ искать как зависимость P от приведенных диаметров $T_{ст}$ и $T_{ж}$, определяемых из формул

$$T_{ст}^2 = D^2 + (\eta - 1)d^2, \quad (5.2.19)$$

$$T_{ж}^2 = \frac{1}{\eta} [D^2 + (\eta - 1)d^2] = \frac{T_{ст}^2}{\eta},$$

$$\eta = \frac{E_{ж}}{E_{ст}}. \quad (5.2.20)$$

При этом имеют место приближенные соотношения

$$P = mT_{ж}^2 + b = nT_{ст}^2 + b. \quad (5.2.21)$$

Значение коэффициентов m , n и b для микропровода из некоторых сплавов сопротивления приведены в табл. 9.

Таблица 9

Значение коэффициентов m , n и b для микропроводов различных типов

Тип микропроводов	m , Г/мкм ²	n , Г/мкм ²	b , Г
МЛСК-40	0,192	0,060	3
МЛСК-37	0,145	0,045	8
МЛСМ-60	0,128	0,056	4
МЛСК-80	0,119	0,035	4
Из сплавов 60НГХ	0,062	0,019	8
Из манганина	0,044	0,021	4

При исследовании влияния влажности на прочность микропровода [32] определено, что кратковременная выдержка в воде образцов медного микропровода диаметром от 10 до 70 мкм и МЛСН-60 диаметром от 5 до 20 мкм не снижает их прочности. Также не наблюдалось уменьшения прочности микропровода с жилой из меди, серебра, никрома и МЛСН-60 после воздействия в течение 500 часов воздуха с относительной влажностью 95—98% при температуре 40°C.

Длительная выдержка при повышенной температуре снижает прочность микропровода, что видно из рис. 89, где показано изменение прочности медного микропровода с $D=40$ мкм и $d=30$ мкм [32]. Кратковременная выдержка не сказывается на прочности. При 500°C микропровод полностью теряет прочность. Как указывается в [29], в результате шестичасовой выдержки при 300°C прочность манганинового микропровода снижается в среднем на 25%.

Разупрочнение микропровода с жилой из резистивных сплавов после длительной термообработки связано с утратой прессэффекта [33].

Дело в том, что в условиях литья микропровода, когда скорость охлаждения — величина порядка 10^6 град/сек, наличие большого количества легирующих компонентов (хром, марганец, кремний) создает возможность образования перекристаллизованной структуры в пере-

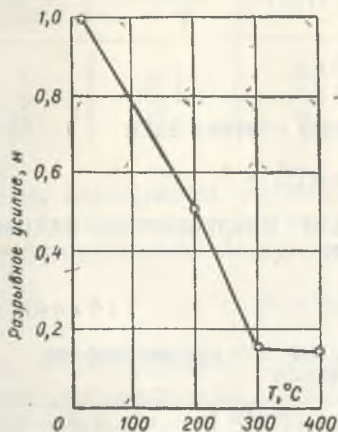


Рис. 89. Зависимость разрывного усилия медного микропровода от температуры 1000-часовой изотермической выдержки

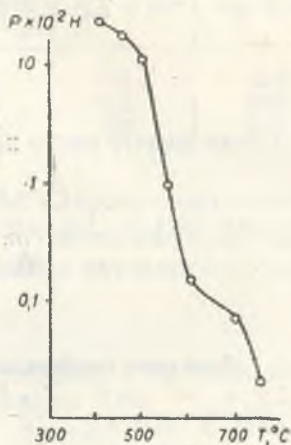


Рис. 90. Зависимость разрывного усилия от температуры нагрева для микропровода из сплава «М» для $d=3,7$ мкм и $\Delta=6,9$ мкм

сыщенных твердых растворах. При этом на различных стадиях распада твердого раствора в нем возникают анизотропные напряжения, резко повышающие механические характеристики жилы микропровода. Утрата микропроводом из резистивных сплавов прессэффекта при длительном старении подтверждается таким экспериментальным фактом. При медленном нагревании образца микропровода, закрепленного с определенным натяжением между двумя стойками, образец, начиная с характерной для каждого сплава температуры, сокращается, после чего происходит его обрыв. Место обрыва носит характер хрупкого излома, что свидетельствует о чисто механических причинах разрушения микропровода.

У микропровода при повышении температуры от 300 до 400°C наблюдается упрочнение, которое увеличивается с ростом толщины изоляции [34]. Это упрочнение связано с уменьшением адсорбционного действия влаги при нагреве стекла и, кроме того, с уплотнением стеклянной изоляции, в которой фиксировалась неплотная упаковка расплавленной стекломассы. При дальнейшем нагреве прочность микропровода заметно снижается (рис. 90). Характер обрыва при темпера-

турах до 450—500°C говорит о хрупком разрушении. После температуры 500°C картины разрывов приобретают пластический характер. В [34] показано, что с ростом температуры прочность состаренного микропровода снижается быстрее, чем обычно.

При обработке медного микропровода в изоляции из стекла С39-1 в плавиковой кислоте проявляется эффект упрочнения микропровода, свидетельствующий о наличии на его поверхности микродефектов (рис. 91, [50]), число которых растет с увеличением D .

Другие возможности упрочнения микропроводов открываются при применении методов ионного обмена и растворной керамики [51]. В методе ионного обмена при обработке микропровода в специальных растворах, например эвтектиках расплавов хлоридов и сульфатов, ион натрия из стеклянной изоляции обменивается на ион лития из расплава в эквимолекулярных количествах. Упрочнение происходит вследствие того, что в поверхностном слое образуются напряжения сжатия, а во внутренних слоях — напряжения растяжения. Эффект упрочнения в этом случае составляет 60—70% [51]. В методе растворной керамики, позволяющем повышать прочность микропровода в 2—3 раза, на стеклянную изоляцию наносится тонкая силикатная пленка, толщина которой колеблется в пределах от десятых долей микрона до одного — двух микрон. Нанесение этой пленки не только сглаживает поверхностные микродефекты в стеклянной изоляции, но и способствует образованию напряжений сжатия в поверхностном слое, что и обуславливает эффект упрочнения.

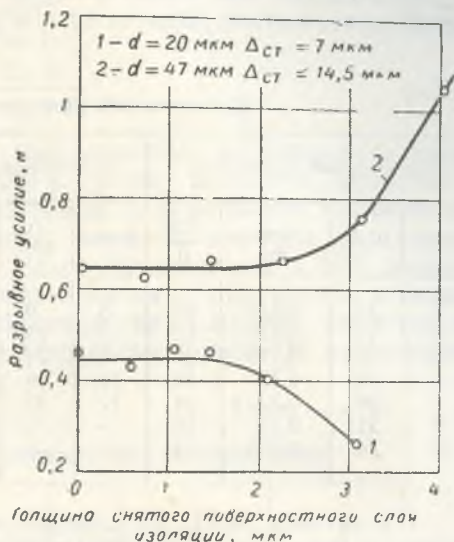


Рис. 91. Зависимость прочности медного микропровода от толщины снятого поверхностного слоя изоляции при обработке в плавиковой кислоте:

1 — в 44%-ной; 2 — в 20%-ной

§ 3. Прочность микропровода при изгибе

Под критическим радиусом изгиба понимают наименьший радиус, на который можно намотать микропровод без нарушения его целостности. В [35] рассмотрен чистый изгиб микропровода при отсутствии

натяжения. В этом случае разброс отдельных измерений значительно меньше чем при растяжении. Кривые распределения лучше аппроксимируются нормальной кривой. Однако и в случае изгиба с ростом поперечных размеров образца разброс данных увеличивается. Так, для образцов манганинового микропровода с $d=3$ мкм и $D=15$ мкм $r_{кр} = 0,178 \pm 0,02$ мм, а для образцов с $d=12$ мкм и $D=24$ мкм имеем $r_{кр} = 0,26 \pm 0,03$ мм. Некоторые наиболее интересные результаты измерения критического радиуса изгиба представлены в табл. 10.

Т а б л и ц а 10

Критический радиус изгиба микропровода

Манганиновый микропровод				Микропровод из сплава Ni60ГХ				Микропровод из спецсплава			
d , мкм	D , мкм	$r_{кр}$, мм	$\frac{2r_{кр}}{D}$	d , мкм	D , мкм	$r_{кр}$, мм	$\frac{2r_{кр}}{D}$	d , мкм	D , мкм	$r_{кр}$, мм	$\frac{2r_{кр}}{D}$
3	15	0,178	24	3	9	0,176	39	3	15	0,23	31
3	19	0,178	19	3	15	0,196	26	6	18	0,231	26
6	18	0,178	20	9	21	0,183	18	9	21	0,226	22
6	22	0,177	16	12	20	0,18	18	—	—	—	—
9	19	0,225	24	12	30	0,225	15	—	—	—	—
9	21	0,185	18	—	—	—	—	—	—	—	—
12	24	0,255	21	—	—	—	—	—	—	—	—

Из данных табл. 10 следует, что повышение внешнего диаметра микропровода вызывает уменьшение его гибкости, т. е. увеличение критического диаметра. Правда, в исследуемом случае зависимость критического радиуса изгиба от поперечных размеров микропровода не столь проста, как для стеклянного волокна. Дело в том, что здесь еще имеет место масштабный эффект увеличения прочности, связанный с уменьшением толщины изоляции, так что критический радиус изгиба является функцией как внешнего диаметра микропровода, так и диаметра металлической нити. При одном и том же внешнем диаметре $D=19$ мкм манганиновый микропровод имеет $r_{кр} = 0,178$ мм для $d=3$ мкм и $r_{кр} = 0,225$ мм для $d=9$ мкм. Аналогичный характер и у других результатов.

В технологических целях удобно характеризовать гибкость микропровода отношением $\frac{2r_{кр}}{D}$. Исследованиями изгиба стеклянного волокна установлено, что для волокон малых диаметров это отношение остается постоянным и лежит в пределах 19—22. Из данных табл. 10 следует, что для довольно широкого диапазона изменения d и D критическое отношение $\frac{2r_{кр}}{D}$ для микропровода можно также считать постоянным и принять равным 20 для манганинового микропровода в

изоляции из стекла нонекс и 24 для микропровода из Н60ГХ и «М» в изоляции из стекла пирекс. Однако при достаточно малых d и D этими оценками пользоваться затруднительно.

Рассматривая деформацию микропровода в приближении линейной теории упругости, можно вычислить напряжения в металлической нити и оболочке в момент разрушения по известным формулам [36]:

$$\sigma_{\text{ов}}^{\text{из}} = \frac{E_{\text{ст}} D}{2r_{\text{кр}} + D}, \quad (5.3.1)$$

$$\sigma_{\text{жв}}^{\text{из}} = \frac{E_{\text{ж}} D}{2r_{\text{кр}} + D}. \quad (5.3.2)$$

Результаты расчета напряжений в марганциновом микропроводе представлены в табл. 11, откуда видно, что с ростом внешнего диаметра и уменьшением толщины изоляции изгибные разрушающие напряжения возрастают до определенной величины, затем дальнейшее увеличение приводит к резкому падению $\sigma_{\text{ов}}$. Из опубликованных в [19] данных следует, что аналогичное явление наблюдается и при изгибе стекляного волокна. Предел прочности оболочки при изгибе значительно больше, чем при растяжении, хотя приведенные в табл. 11 напряжения

Таблица 11

Изгибные напряжения в марганциновом микропроводе

d , мкм	3	3	6	6	9	9	12
D , мкм	15	19	18	22	19	21	24
$\sigma_{\text{жв}}^{\text{из}}$, $\frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$	102	101	202	201	242	290	283
$\sigma_{\text{ов}}^{\text{из}}$, $\frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$	245	307	291	353	319	325	272

также являются растягивающими. Это объясняется следующими причинами. Во-первых, длина испытуемого образца при изгибе значительно меньше, чем при испытании на растяжение. Так, участвующая в изгибе длина образца 0,5—0,7 мм, в то время как минимальная длина образца при испытании на растяжение 10 мм. Следовательно, с одной стороны, имеет место масштабный эффект второго ряда. Кроме того, при изгибе под действием растягивающих усилий находится не весь микропровод, а только часть его. Можно считать, что в этой ситуации эффективный поперечный размер образца уменьшается как бы вдвое. А если учесть быстрое падение напряжений с приближением к нейтральной оси, то найдем, что под действием значительных растягивающих напряжений находится примерно четверть образца. Таким обра-

зом, с другой стороны, при изгибе проявляется масштабный эффект первого рода.

В связи со сказанным можно сделать следующее замечание. При обычном растяжении испытание образцов размером меньше 8—10 мм не представляется возможным, поэтому об упругих и прочностных свойствах образцов малой длины можно судить по результатам испытания на изгиб.

Отметим еще, что в зависимости от отношения между внутренним и внешним диаметрами микропровода может создаваться такая ситуация, когда напряжения в металлической жиле будут большими, чем в стеклянной оболочке. Однако даже при достижении критического радиуса изгиба металлическая жила не разрушается. При изгибе микропровода, лишенного изоляции, образец не разрушался даже при достижении радиусов изгиба на порядок меньше критического. Это, по-видимому, связано с возможными пластическими деформациями в жиле. Стеклянная же оболочка претерпевает хрупкое разрушение, о чем свидетельствует ее быстрое разрушение при достижении критического радиуса изгиба.

Было обнаружено, что внешняя среда мало влияет на величину критического радиуса при чистом изгибе. Так, воздействие на микропровод в течение 24 часов водой и трансформаторным маслом приводит к тому, что критический радиус изгиба возрастает на 10—15%.

Практически важен случай изгиба микропровода с одновременным его растяжением, что реализуется при намотке резисторов под натягом [37].

Будем считать, что предел прочности микропровода определяется пределом прочности при растяжении. Поэтому можно рассматривать только ту область, в которой микропровод находится под действием растягивающих напряжений. Последние являются алгебраической суммой напряжений, возникающих от изгиба и от растяжения. Тогда, используя соотношения (5.2.1), (5.3.1), (5.3.2), получаем выражение для допустимого радиуса изгиба, обеспечивающего прочность стеклянной изоляции и металлической жилы:

$$r_{1\text{кр}} \geq \frac{D}{2} \left\{ \frac{1}{\frac{\sigma_{\text{ов}}}{E_{\text{ст}}} - \frac{P}{S_{\text{ж}} [E_{\text{ж}} + E_{\text{ст}} (k^2 - 1)]}} - 1 \right\}, \quad (5.3.3)$$

$$r_{2\text{кр}} \geq \frac{d}{2} \left\{ \frac{1}{\frac{\sigma_{\text{жв}}}{E_{\text{ж}}} - \frac{P}{S_{\text{ж}} [E_{\text{ж}} + E_{\text{ст}} (k^2 - 1)]}} - 1 \right\}, \quad (5.3.4)$$

где P_0 — усилие натяга. Формула (5.3.3) позволяет выбрать радиус каркаса, на который микропровод наматывается без разрушения стек-

лянной изоляции, а (5.3.4) дает величину радиуса каркаса, при намотке на который сохраняется целостность металлической жилы. В общем же случае радиус изгиба должен одновременно удовлетворять обоим неравенствам.

На рис. 92 графически представлены результаты расчетов по формуле (5.3.3) для марганцевого микропровода. Как видно из приводи-

мых кривых, с увеличением радиуса изгиба увеличивается и допустимый натяг. Кривая зависимости $P=f(r)$ сначала возрастает, затем доходит до «насыщения» и асимптотически стремится к некоторому предельному значению P , равному разрывному усилию микропровода. На рис. 93 представлены зависимости допустимых величин натяга от толщины стеклянной изоляции для микропроводов с различными диаметрами жил при намотке на каркасы разных радиусов. Приведенные на этих рисунках кривые показывают, что намотка микропровода с диаметром жилы от 3 до 12 мкм и толщиной изоляции до 8 мкм на каркас радиусом менее 1 мм в холодном состоянии технологически невозможна.

Экспериментальные исследования в основном подтвердили приведенные выражения, что видно из рис. 94. В [38] исследовалось влияние усилия натяжения на целостность стеклянной изоляции микропровода из меди и Н60ГХ. Авторы отмечают, что линейное растяжение микропровода при намотке вызывает в бинарной системе металл—стекло значительно меньшие напряжения, чем изгиб. По данным [42] для микропроводов из сплавов МЛСК-52, МЛСК-53, МЛСК-55 и Н60ГХ с диаметром жилы 10—15 мкм и наружным диаметром от 15 до 25 мкм критический радиус изгиба находится в пределах от 0,5 до 1,2—1,5 мм. Аналогичные результаты получены в последнее время и зарубежными исследователями. Так, критический радиус изгиба марганцевого микропровода, изготавливаемого английскими фирмами, равен 0,75 мм для 40 мкм $< D < 60$ мкм, а для медного и марганцевого микропровода при 10 мкм $< D < 40$ мкм лежит в пределах 1,5—3 мм [39]. По данным [40] $r_{кр} = 0,75 \pm 1$ мм для медного микропровода с $d = 8 \div 12$ мкм и $D = 25 \div 30$ мкм, выпуск которого освоен в Японии.

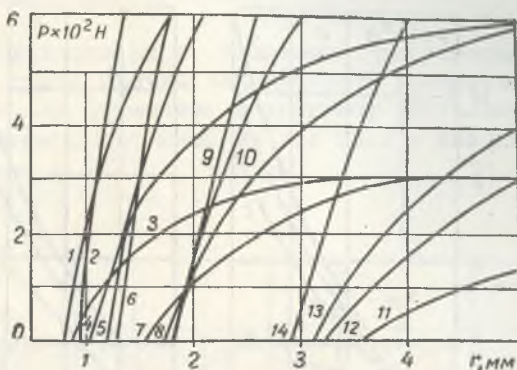


Рис. 92. Теоретические кривые зависимости предельной величины натяжения при намотке от радиуса изгиба микропровода (без разрушения стеклянной изоляции):

1 и 2 — $d = 3$ мкм, $\Delta = 6,8$ мкм; 3—6 — $d = 6$ мкм, $\Delta = 2, 4, 6, 8$ мкм; 7—10 — $d = 9$ мкм, $\Delta = 2, 4, 6, 8$ мкм; 11—14 — $d = 9$ мкм, $\Delta = 2, 4, 6, 8$ мкм

Трещины в стеклянной изоляции появляются постепенно, что связано с проявлением дефектов, на которых концентрируются напряжения, превышающие предел прочности стекла. В местах поврежденной изоляции имеет шероховатый вид, причем локальное повреждение вле-

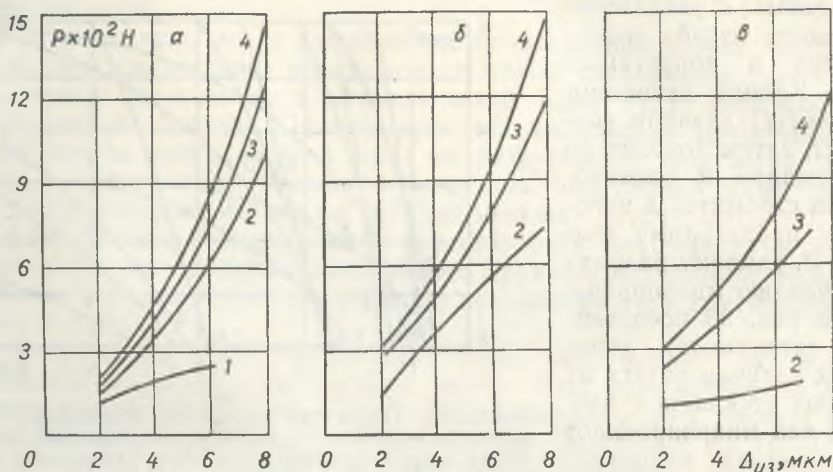


Рис. 93. Зависимость предельного натяжения при изгибе от толщины стеклянной изоляции микропровода:

$a - d=3$ мкм; $б - d=6$ мкм; $в - d=9$ мкм; r (в мм): 1- $r=1$; 2- $r=2$; 3- $r=3$; 4- $r=4$

чет за собой ее отслоение от жилы. При $D > 28$ мкм и радиусе изгиба $r \leq 1$ мм микропровод, как правило, пружинит и его намотка на оправку при натяжениях порядка 0,5 затруднительна. В то же время при достаточно больших натяжениях $P > 1,5 - 2$ Г микропровод с течением времени лопаается и на образцах появляются так называемые «усы» — торчащие концы микропровода.

Таблица 12
Сохранность стеклянной изоляции

Напряже- ние в на- ружном слое, кг/мм ²	Время раз- рушения изоляция, мин	Напряже- ние в на- ружном слое, кг/мм ²	Время раз- рушения изоляция, мин
5,2	0,3	1,8	45
4,2	0,5	1,55	65
3,0	1	1,4	105
2,2	25	1,25	165

Исследования сохранности стек-
лянной изоляции по времени пока-
зали, что при натяжении в процес-
се изгиба, не превышающем 3 Г,
в течение 3000—3500 часов разру-
шается 40—70% образцов для
 $r_{из} \leq 4$ мм, после чего оставшиеся со-
храняются неопределенно долго
(рис. 95). Данные по сохранности
стеклянной изоляции под воздей-

ствием изгибающих напряжений приведены в табл. 12, они [41] хорошо укладываются в эмпирические зависимости

$$\text{при } \sigma_{\text{ст}} < 3 \text{ кн/мм}^2 \quad \sigma_{\text{ст}} = 1 + \frac{38}{15t + 4},$$

$$\text{при } \sigma_{\text{ст}} > 3 \text{ кн/мм}^2 \quad \sigma_{\text{ст}} = 1 + 0,2 \operatorname{cth} \frac{t+25}{250}.$$

Расчеты показывают, что стеклянная изоляция микропровода $D=30$ мкм может в течение одной минуты выдерживать изгибающее напряжение 10 кн/мм^2 . Однако со временем допустимое изгибающее напряжение снижается, уменьшаясь, например, за три года в два раза.

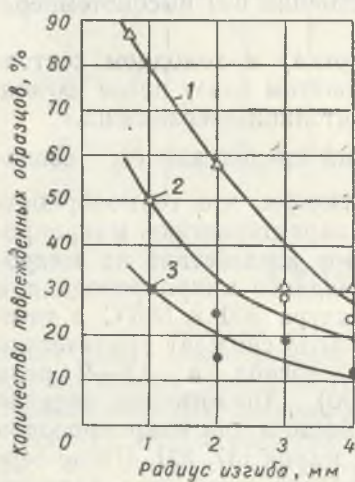


Рис. 94. Экспериментальная зависимость прочности стеклянной изоляции (нонекс) от радиуса изгиба и натяжения при изгибе. Натяжение: 1— $5 \cdot 10^{-2}$ Н; 2— $2,5 \cdot 10^{-2}$ Н; 3— $5 \cdot 10^{-3}$ Н

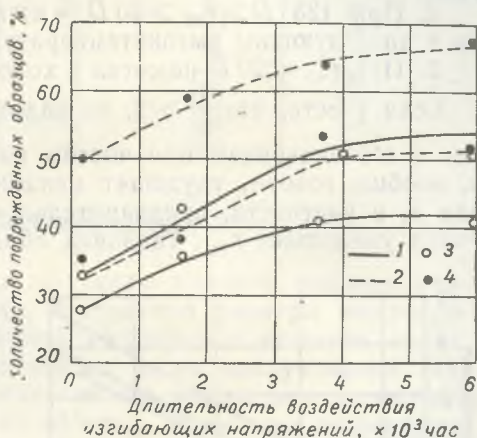


Рис. 95. Длительная прочность на изгиб изоляции из стекла № 17 манганинового микропровода: 1—натяжение при изгибе $5 \cdot 10^{-3}$ Н; 2—натяжение при изгибе $2,5 \cdot 10^{-2}$ Н; 3— $r=4$ мм; 4— $r=1$ мм

В соответствии с приведенными результатами в [41] для критического радиуса изгиба получено соотношение $r_{\text{кр}} = 125 D$. Отметим, что в [43] для зависимости разрушающих изгибных напряжений от времени предложена эмпирическая формула другого вида. Однако нет оснований отдавать ей предпочтение.

Естественно, с ростом температуры при намотке критический радиус изгиба уменьшается и может достичь величины, соизмеримой с радиусом самого микропровода. Следует учесть также, что высокотемпературный отжиг непосредственно после изгиба снимает возникающие

напряжения и соответственно позволяет уменьшить $r_{кр}$. С учетом этого в [43] предложена формула

$$r_{кр} \geq 35 \frac{t' + 30}{t' + 70} D, \quad t' = t_n + t_T,$$

где t_n — время намотки в мин, t_T — время отжига в мин. Для известного режима термообработки $450^\circ\text{C} - 20$ мин, отсюда получаем $r_{кр} = 200 D$. Аналогичный результат получен ранее в [32]. Там же сделан вывод о том, что изменение скорости намотки от 20 до 100 об/мин практически не влияет на величину $r_{кр}$.

Анализ приведенных данных позволяет установить такую классификацию $r_{кр}$ [43] при натяжении микропровода в пределах 1—2 Г и с учетом временной зависимости разрушающих напряжений:

1. При $r_{кр} > 125 D$ изгиб в холодном состоянии без высокотемпературного отжига.

2. При $125 D > r_{кр} > 20 D$ — изгиб (намотка) в холодном состоянии с последующим высокотемпературным отжигом сразу после изгиба.

3. При $r_{кр} < 20 D$ намотка в холодном состоянии невозможна.

Если учесть, что $\frac{D}{d} \sim 2$, то видим: нижний предел для $r_{кр}$ совпадает с его значением при чистом изгибе. Отметим, что термообработка, вообще говоря, ухудшает механические характеристики микропровода и, в частности, предварительное тепловое воздействие на микропровод уменьшает $r_{кр}$. Тепловая обработка медного микропровода при температуре 300 и 500°C в течение 6 часов снижает критический радиус изгиба в 1,5—2 раза (рис. 96). Аналогичное явление имеет место и для микропроводов других марок [37, 32]. После термообработки изгиб при радиусе, равном критическому, вызывает у тонких проводов точечные повреждения, а у толстых — ослабление стеклянной изоляции, что авторы объясняют характером разрастания микродефектов в процессе отжига.

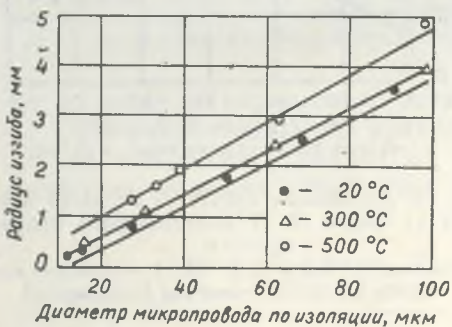


Рис. 96. Зависимость допустимого радиуса изгиба медного микропровода от диаметра по изоляции при различных температурах тепловой обработки в течение 6 часов

медный микропровод с $d < 14$ мкм является по сечению монокристаллом с направлением [001] вдоль оси микропровода, по длине которого отдельные монокристаллы длиной до нескольких миллиметров следуют один за другим с направлением [001] и по-

воротом относительно друг друга на угол порядка $0,5-1^\circ$. Микропроводы больших диаметров имеют поликристаллическую структуру с крупными зернами различной ориентировки. В технических условиях на микропровод обычно нормируются требования на разрывное усилие и радиус изгиба. Значения $P_{\text{доп}}$ для некоторых микропроводов приведены в табл. 13.

Таблица 13

Допустимое разрывное усилие микропровода

Манганиновый микропровод [8]		МЛСН [9]		Медный микропровод [1]	
r , ком/м	P — не менее 10^{-2} , н	r , ком/м	P — не менее 10^{-2} , н	d , мкм	P — не менее 10^{-2} , н
1,5 — 2,9	10	$10 \pm 3,5$	20	12	18
3 — 5	9	20 ± 7	12	20	30
5 — 9	8	40 ± 14	8	32	50
10 — 14	8	80 ± 28	5	70	70
14 — 20	8	160 ± 64	3	120	120
20 — 40	6	—	—	120	200
40 — 70	6	—	—	160	300
70 — 150	6	—	—	200	400

§ 4. Кручение микропровода

На сопротивление микропровода кручению сильное влияние оказывают длина испытываемого отрезка, поперечные размеры микропровода, состояние поверхности стеклянной изоляции и внешняя среда.

Была изучена зависимость предельного числа закручиваний [44] на единицу длины испытываемого образца от его длины при натяжении $5 \cdot 10^{-3}$ н и скорости закручивания 45 об/мин. Обработка экспериментальных данных с помощью метода наименьших квадратов дает для этой зависимости следующие эмпирические формулы:

$$\frac{n}{l} = \frac{5,691}{l} + 0,431 \quad (\text{для манганина}), \quad (5.4.1)$$

$$\frac{n}{l} = \frac{6,46}{l} + 0,026 \quad (\text{для сплава Н60ГХ}), \quad (5.4.2)$$

$$\frac{n}{l} = \frac{4,126}{l} + 0,184 \quad (\text{для сплава „М“}). \quad (5.4.3)$$

Изучена также зависимость предельного числа закручиваний микропровода от диаметра металлической нити при $l=25$ мм и $\Delta=5$ мкм. Аналитический вид ее:

$$n = \frac{57,3}{d} + 5,3 \quad (\text{для манганина}), \quad (5.4.4)$$

$$n = \frac{42}{d} + 1,2 \quad (\text{для сплава Н60ГХ}), \quad (5.4.5)$$

$$n = \frac{31,1}{d} + 4,3 \quad (\text{для сплава „М“}). \quad (5.4.6)$$

Максимальное отклонение экспериментальных точек от аналитической кривой 10—15%. Формулами можно пользоваться для $3 \text{ мкм} < d \leq 12 \text{ мкм}$.

В табл. 14 сведены результаты исследований зависимости предельного числа закручиваний микропровода от толщины стеклянной изоляции для образцов длиной 25 мм и $d=6 \text{ мкм}$.

Таблица 14

Зависимость предельного числа закручиваний от толщины изоляции

Δ , мкм	2	4	6	8
Манганин	11,7	14,3	17,6	18,1
Н60ГХ	11,2	15,7	7,2	9,9
Спецсплав	17,8	5,7	7,4	9,7

В работе [45], где измерялось кручение манганинового микропровода, для разрушающих касательных напряжений в стеклянной изоляции получены такие эмпирические зависимости:

$$\tau_{\text{в}} = \frac{500}{(D + 0,005)(l + 250)} + 13, \quad (5.4.7)$$

$$\tau'_{\text{в}} = \frac{500}{(D + 0,004)(l + 240)} + 13. \quad (5.4.8)$$

Формула (5.4.7) соответствует отсутствию слая металлической жилы со стеклянной изоляцией, (5.4.8) —наличию такого слая. Этими формулами можно пользоваться при $l=5-200 \text{ мм}$ и $D=10-25 \text{ мкм}$. Из того факта, что разность между $\tau_{\text{в}}$ и $\tau_{\text{в}}^1$ мала (порядка 10%), следует, что наличие или отсутствие слая между металлом жилы и стеклянной изоляцией не оказывает существенного влияния на механические характеристики микропровода. Из приведенных зависимостей видно, что и при кручении в значительной степени проявляется масштабный эффект.

§ 5. Температурный коэффициент расширения микропровода

Нагрев микропровода сопровождается изменением его длины. Обычно зависимость длины микропровода от его температуры принимают линейной и записывают в виде

$$l_2^M = l_1^M (1 + \alpha_{l_M} \Delta t), \quad (5.5.1)$$

где $\Delta t = t_2 - t_1$, t_1 — исходная температура, t_2 — конечная температура, l_1^M и l_2^M — начальная и конечная длины отрезка микропровода соответственно, α_{l_M} — температурный коэффициент линейного расширения микропровода в заданном интервале температур (t_1, t_2). Вследствие того, что температурные коэффициенты линейного расширения стекла и металла ($\alpha_{l_{ст}}$ и $\alpha_{l_{ж}}$) различны, нагрев микропровода приводит к возникновению в нем напряжений, которые по закону Гука соответственно для жилы и капилляра записываются в виде [52]

$$\frac{F}{S_{ж}} = E_{ж} \frac{l_2^M - l_1^M}{l_1^M} = \frac{E_{ж}}{l_1^M} [l_1^M (1 + \alpha_{l_{ж}} \Delta t) - l_1^M (1 + \alpha_{l_M} \Delta t)], \quad (5.5.2)$$

$$-\frac{F}{S_{ст}} = -\frac{E_{ст}}{l_1^{ст}} (l_2^M - l_1^M) = \frac{E_{ст}}{l_1^{ст}} [l_1^M (1 + \alpha_{l_M} \Delta t) - l_1^{ст} (1 + \alpha_{l_{ст}} \Delta t)], \quad (5.5.3)$$

где F и $-F$ — силы взаимодействия жилы и стеклянного капилляра при температуре t_2 .

Таблица 15
ТКР микропроводов из сплавов сопротивления

Микропровод	D, мкм	d, мкм	k	$\alpha \cdot 10^{-6}$, град $^{-1}$	
				20 — 100°C	20 — 200°C
МЛСН-60	19	13,0	1,4	8,2	8,0
	17	9,0	1,9	6,8	6,7
	20	9,5	2,4	5,4	5,6
Манганиновый	16	10,0	1,6	11,8	11,7
	16	8,5	1,9	9,6	9,8
	13	4,0	3,2	7,0	7,0
МЛСН-80	15	10,0	1,5	13,0	13,4
	16	8,0	2,0	10,2	10,3
	20	5,0	4,0	6,5	6,5
Медный	14	7,0	2,0	6,5	6,5
	25	9,0	2,8	6,5	6,5
	40	12,0	3,3	6,1	6,1

Нагревание не вызывает перемещения жилы и стеклянного капилляра в направлении продольной оси, в силу чего должны быть равны выражения (5.5.2) и (5.5.3):

$$\begin{aligned} E_{ж} S_{ж} [l_1^M (1 + \alpha_{l_{ж}} \Delta t) - l_1^M (1 + \alpha_{l_M} \Delta t)] = \\ = E_{ст} S_{ст} [l_1^M (1 + \alpha_{l_M} \Delta t) - l_1^{ст} (1 + \alpha_{l_{ст}} \Delta t)]. \end{aligned} \quad (5.5.4)$$

Решая (5.5.4) относительно α_{I_M} , получаем окончательную формулу для расчета ТКР литых микропроводов в стеклянной изоляции:

$$\alpha_{I_M} = \frac{(D^2 - d^2) d_{I_{CT}} E_{CT} + d^2 \alpha_{I_{Ж}} E_{Ж}}{(D^2 - d^2) E_{CT} + d^2 E_{Ж}} = \frac{\left[\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1\right] \alpha_{I_{CT}} E_{CT} + \alpha_{I_{Ж}} E_{Ж}}{\left[\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1\right] E_{CT} + E_{Ж}}. \quad (5.5.5)$$

Отсюда видно, что при неизменных материалах жилы и изоляции ТКР микропровода определяется только величиной k . При использовании формулы (5.5.5) расхождения между экспериментальными и расчетными значениями ТКР микропровода не превышают 5%. Значения α_{I_M} для некоторых микропроводов из сплавов сопротивления приведены в табл. 15.

В [11] для медного микропровода приводятся следующие значения α : $6,8 \cdot 10^{-6}$ 1/град ($k=4$) и $8 \cdot 10^{-6}$ 1/град ($k=2$), которые хорошо согласуются с приведенными в табл. 15 результатами.

§ 6. Тензочувствительность микропровода

Тензоэффект состоит в изменении электрического сопротивления проводника при его деформации. Для количественной характеристики этого свойства микропровода вводится коэффициент тензочувствительности, который определяется из соотношения

$$S = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}}$$

Коэффициент тензочувствительности микропровода зависит от условий его получения и от свойств исходного сплава. На рис. 97 представлено изменение тензочувствительности жилы микропровода по длине бобины через каждые 200 м [46]. Видно, что для жилы из фильерного сплава Н60ГХ коэффициент тензочувствительности значительно меняется по длине бобины, что, по-видимому, связано с изменением химического состава сплава в процессе литья. В то же время тензочувствительность жилы из литейного сплава типа „М” остается практически постоянной. Стеклянная изоляция в пределах погрешности измерения коэффициента тензочувствительности не влияет на его величину.

В силу того что для ряда металлов и сплавов в жиле микропровода имеют место отклонения от упругого поведения при деформации, тензочувствительность таких микропроводов меняется при повторном

нагружении. В частности, это относится к микропроводам из пластических металлов и сплавов, таких как медь, манганин и МНК-40 [23]. Характерная зависимость относительного изменения электросопротивления микропровода МЛСМ-60 (с жилой из сплава МНК-40) от отно-

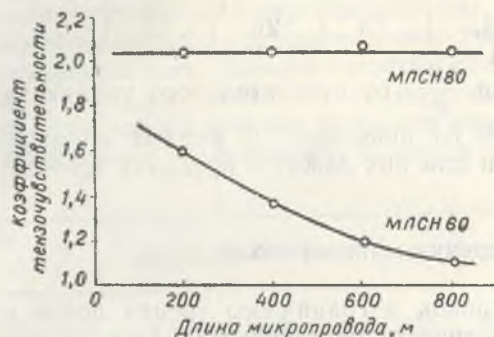


Рис. 97. Изменение тензочувствительности жилы микропровода по длине бобины

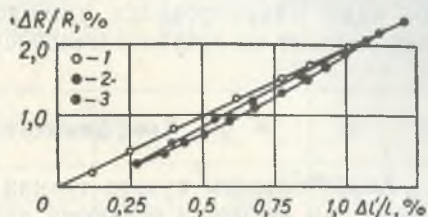


Рис. 98. Зависимость электросопротивления микропровода МЛСМ-60 от относительной деформации при циклическом нагружении:

1 — первое нагружение; 2 — первое разгружение; 3 — повторное нагружение

сительной деформации при циклическом нагружении приведена на рис. 98 [23]. С повышением температуры до 400°C тензочувствительность микропровода снижается на 5—7% (табл. 16).

Таблица 16

Изменение коэффициента тензочувствительности микропровода из никельхромкремниевого сплава в зависимости от температуры [47]

$t, ^\circ\text{C}$	10	100	200	300	400
S	2,29	2,20	2,20	2,18	2,14

Из-за нестабильности электросопротивления микропровода его тензочувствительность меняется со временем. Для снижения этой нестабильности рекомендуется термообработка микропровода. Например, для микропровода с жилой из никельхромкремниевых сплавов, из которых изготавливают тензорезисторы для работы при температурах до 400°C, оптимальный режим термообработки при 430°C будет 4 часа [47]. Значения коэффициента тензочувствительности для микропроводов из различных металлов и сплавов приведены в табл. 17.

Таблица 17

Тензочувствительность микропровода

Сплав	Н60ГХ [46]	М* [46]	МЛСК-52 [23]	МЛСК-53 [23]	МЛСК-55 [23]	МЛСК-37	МЛСК-40	МЛСМ-60	МЛСК-80
S	1,1—1,6	2,0	2,0	2,0	1,5	1,9	2,0	1,9	1,6

В [48] приводятся зависимости $\frac{\Delta R}{R}$ от относительного удлинения для ряда микропроводов с жилой из никелевых и медных сплавов. Коэффициент тензочувствительности для них лежит в пределах 1,6—2,5.

§ 7. Коэффициент трения микропровода

Коэффициенты сухого трения покоя и граничного трения покоя с изменением нагрузки остаются практически постоянными (исключение составляет случай контактирования микропровода с латуной). В то же

Таблица 18

Данные по коэффициенту трения микропровода [49]

Вид трения	Материал, контактирующий с микропроводом							
	латунь	дюралю- миний	эбонит	гетинакс	фторо- пласт	сталь	фарфор	стекло
Сухое трение	0,26*	0,23*	0,2*	0,34*	0,15*	0,21*	0,32	1,50
Граничное трение	0,2*	0,16*	0,19*	0,22*	0,15*	0,21	0,30	1,15
Сухое трение скольже- ния	0,20	0,17	0,15	0,26	0,09	0,15	0,24	1,2
Граничное трение сколь- жения	0,10	0,12	0,13	0,12	0,10	0,13	0,26	0,8

* Усреднено для интервала нормальных нагрузок от 10 до 50 Г/м

время коэффициенты жидкостного трения покоя и скольжения в значительной степени зависят от величины приложенной нормальной нагрузки [49].

§ 8. Характер спая между стеклом и металлом в микропроводах

Процесс литья микропровода как было показано, сопровождается взаимодействием расплавленного металла с размягченной стеклянной оболочкой. Характер этого взаимодействия во многом определяет воз-

возможность получения микропровода из данной пары металл—стекло. С другой стороны, результат этого взаимодействия оказывает непосредственное влияние на свойства микропровода.

Авторы [53], анализируя процесс литья медного микропровода, высказали предположение, что взаимодействие исходных материалов носит кислотно-основной характер, интенсивному протеканию которого способствует наличие двух жидких фаз, тесный контакт на их границе, сопровождающийся одновременным действием механических усилий и наложением поля высокой частоты. Электронномикроскопические и металлографические исследования медного микропровода в стекле С39-1 показали, что на границе медь—стекло имеется слой окиси меди, толщина которого увеличивается с ростом жилы (табл. 19).

Таблица 19

Диаметр жилы	20	40 — 75	100	200—300	600	>600
Толщина слоя окиси меди . . .	0,2	0,25—0,3	0,4	0,5	0,54	0,6

Непосредственно к слою окиси примыкает бескислородный слой меди, наличие которого, по-видимому, объясняется растворением окиси меди на границе в стекле и смещением ее к границе по этой причине. Последнее вызывает образование слоя стекла измененного состава по сравнению с исходным стеклом. Если количество окиси меди в жиле достигает 1,3—1,7%, то в стеклянной изоляции наблюдается диффузионный слой.

Электронномикроскопический анализ микропроводов с жилой из золота, легированного хромом, в стекле марки С39-1 [54] не позволил установить наличие пленки переходного слоя между металлом и стеклом, но косвенно ее существование подтверждено обнаруженными в стекле включениями сферолитной формы, расположение которых имеет тенденцию к образованию цепочек и разветвлений, сходных с дендритами. Исследование поверхности стеклянной изоляции, примыкающей к жиле микропровода из чистого золота, показало, что между жилой и стеклом также присутствует пленка переходного слоя.

Таким образом, при литье микропровода из меди и серебра образуется окисный слой толщиной 0,1—0,5 мкм со следами диффузии слоя в стекле. Золото также образует переходный слой, но значительно более тонкий, чем у медных и серебряных микропроводов.

Образование переходного и диффузионного слоев различной толщины в микропроводах из рассматриваемых металлов связано, по мнению авторов [54], с различной растворимостью и поверхностной активностью кислорода в этих металлах.

Толщина переходного слоя микропроводов с диаметром жилы порядка 10 мкм из медноникелевых сплавов и Н60ГХ составляет 0,1—0,2 мкм [55]. Такого же порядка толщина переходного слоя обнаружена

в микропроводах из манганина, Н63ГХ и никельхромкремниевых сплавов. Переходный слой состоит из окисной фазы, а диффузионный слой в стеклянной изоляции наблюдается в виде сферолитовых частиц [56, 58]. В [57, 58] высказывается предположение, что переходный слой по всей длине микропровода обеспечивает прочное соединение металла со стеклом. На основе электронномикроскопических исследований манганинового микропровода получено, что характер сцепления носит пунктирообразный характер и что жила в большей части остается свободной. Совсем противоположные результаты сообщаются в [21], где в итоге исследований получено, что характер связи жилы с изоляцией — всегда спай. Авторами обнаружено, что в микропроводах с жилой из меди, олова, серебра, сплавов медь—никель, Н60ГХ спай жилы с изоляцией имеет в основном окисный характер, а в микропроводах с жилой из германия, чугуна, кобальтовых сплавов — механический. Бывают случаи механического спаивания и в медных микропроводах. По-видимому, в медном микропроводе имеет место как окисный механизм образования спаивания, так и механический. Эти механизмы либо проявляются одновременно, либо один из них преобладает над другим.

О пунктирообразном соединении жилы манганинового микропровода со стеклянной изоляцией упоминается также и в [59], где на основании измерений удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости стеклянной изоляции при высоких температурах указывается, что в манганиновом микропроводе непосредственный контакт со стеклянной изоляцией имеет место лишь на 10% длины микропровода, а толщина возможного зазора жилы—стекло значительно меньше толщины самой изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Микропровода медные литые в стеклянной изоляции. ММЛС. ЮБЮ.664.000ТУ редакция, 1—66.
2. Медные провода в стеклянной изоляции. ВТУ СКТБМП, № 20—1—63.
3. В. Г. Тимофеев. Получение остеклованной микропровода из золота и его сплавов. Электропромышленность и приборостроение, № 16, 1960, 10—12.
4. R. G. S. Clarke, Microwire — a new engineering material. Electronic Components, № 9, 1963, 917—922.
5. Ковамата Коваси, Сэкигути Такэси. Микропровода со стеклянной изоляцией. Когё дзапрё, 1966, 14. № 7, 41—44. Реферат Р.Ж. Энергетика и электротехника, № 4, 1967, Б11711.
6. Э. А. Альфтан. Литые микропровода в стеклянной изоляции из сплавов сопротивления. Вопросы радиоэлектроники. Серия III. Детали и компоненты аппаратуры, вып. 10, 1964, 11—16.
7. R. G. S. Clarke. Méthode révolutionnaire de production de fils électriques ultra-fins. Électronique professionnelle, 31, № 320, 1962, 58—60.
8. Манганиновый микропровод в стеклянной изоляции ТУ.ОМЧ. 645. ООН.
9. Микропровода высокоомные литые в стеклянной изоляции. МССН60, ТУ ЮБЮ.664.002ТУ.

10. Э. А. Альфтан, С. В. Деянова. Микропровода МЛСК-40, МЛСК-37, МЛСК-80 и МЛСМ-60. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 4. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 78—91.
11. Technical Communication N 388. An Electrical Conductor of Unusual Properties G.D.-microwire. Applied, research instruments LTD.
12. М. М. Подгорнов. Исследование физических свойств стеклопровода. Кандидатская диссертация. М., 1967.
13. З. В. Литвак, Л. В. Почапская. О геометрии микропровода в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 6. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1969, 133—143.
14. Н. Р. Берман, М. В. Гивельберг, В. Г. Чебан. Разрывная прочность микропровода. Изв. АН МССР, серия физико-технич. и матем. наук, 1969, № 3, 30—39.
15. Е. И. Федотова, Г. Г. Карасева, Б. В. Фармаковский, А. М. Фирсов, Н. П. Шмулова. Исследование свойств стекломатериалов для литья микропроводов в стеклянной изоляции. Электронная техника, серия «Радиокомпоненты», вып. 2, 1969, 60—73.
16. Накарава Дзюнкити, Фурукава Тадао, Кого Масаоми, Хитати херон. Hitachi huogon, 48, № 3, 1966, 403—407.
17. В. А. Шпирнов. Расчетные веса микропровода различных диаметров. Микропровод и приборы сопротивления, вып. II. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1964, 257—268.
18. Непрерывное стеклянное волокно. Под редакцией М. Г. Черняка. М., «Химия», 1965.
19. А. Ф. Зак. Физико-химические свойства стеклянного волокна. М., Гостехиздат, 1962.
20. В. С. Ленский. Вопросы механики литого микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 3—15.
21. Н. Я. Карасик, Н. Е. Фаддеева. Электронно-микроскопическое исследование структуры микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 138—146.
22. Н. В. Богачева, Э. М. Иванова, Б. В. Фармаковский. Свойства литых микропроводов с жилой из чистых металлов. Электронная техника, серия «Радиокомпоненты», вып. 1, 1967, 65—69.
23. Э. А. Альфтан, Л. Н. Антонова, А. М. Фирсов. Исследование механических характеристик микропроводов при растяжении. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1969, 100—109.
24. Е. Я. Бадинтер, Е. М. Лыско. Прочность литого микропровода в стеклянной изоляции диаметром до 30 мк. Микропровод и приборы сопротивления, вып. I. Кишинев, «Штиинца», 1962, 52—63.
25. Е. Я. Бадинтер, З. И. Зеликовский. Исследование свойств литых микропроводов из сплавов сопротивления со стеклянной изоляцией. Кабельная техника, вып. 35, 1965, 31—35.
26. Н. Р. Берман, М. В. Гивельберг, В. Г. Чебан. Исследование механических свойств составных сверхтонких нитей. IV Всесоюзный симпозиум по волновой динамике. Тезисы докладов, 1968.
27. П. Я. Александров, С. Н. Журков. Явления хрупкого разрушения, ГТТИ, 1933.
28. Исследования по высокопрочным сплавам и нитевидным кристаллам. Сборник докладов под редакцией И. А. Оди́нга. Изд.-во АН СССР, 1963.
29. А. М. Надгорный, Б. И. Смирнов. К вопросу о структуре микропровода меди. ФТТ, 11, вып. 12, 1960, 3048—3049.
30. А. А. Буренина, Н. Я. Карасик, И. М. Касаткина, В. П. Матвеев. Металлографическое исследование капель и микропроводов из меди. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 65—73.
31. Р. С. Козловская, И. М. Касаткина, В. П. Матвеев, А. А. Буренина, Н. Я. Карасик. Влияние некоторых технологических факторов на микроструктуру про-

- водов с жилой из меди. Электронная техника, серия «Радиокомпоненты», вып. 1, 1967, 69—75.
32. Б. В. Фармаковский. Исследование некоторых физико-механических свойств литых микропроводов в условиях повышенных температур, повышенной влажности и вакуума. Вопросы радиоэлектроники. Серия детали и компоненты аппаратуры, вып. 10, 1964, 124—138.
 33. Е. Я. Бадинтер, С. И. Балабан, И. Я. Карасик, Б. В. Фармаковский. К вопросу о влиянии пресс-эффекта на свойства литых микропроводов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VIII. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1971.
 34. Л. Б. Нестеровская, В. И. Шнайдерман. Разрывная прочность микропровода при температурах 300—700°C. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VI. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1971, 124—130.
 35. Н. Р. Берман, М. В. Гивельберг, В. Г. Чебан. Прочностные свойства микропровода при изгибе. Изв. АН МССР, серия физико-технич. и матем. наук, 1969, № 3, 65—68.
 36. Н. И. Мухелишвили. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., изд. АН СССР, 1954.
 37. Е. Я. Бадинтер, Н. Р. Берман, И. Г. Лазурьевская, Т. С. Овсянникова. Определение допустимого радиуса изгиба при намотке в холодном состоянии изделий из микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. II. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1964, 71—88.
 38. Н. И. Тимофеева, Б. В. Фармаковский. Влияние технологических операций изготовления микрорезисторов на изменение характеристик литых микропроводов. Электронная техника, серия 9, «Радиокомпоненты», вып. 1, 1967, 76—81.
 39. G. D. Microwire. Very fine high and low temperature glass insulated wire, 2.
 40. Кога Масаоми, Дэнси Дзайре, Electronic Parts 8c, Materials, 1965, 4, № 4, 97—99.
 41. В. В. Трояновский. Малогабаритные проволочные сопротивления, стабильные во времени. Микропровод и приборы сопротивления, вып. I. Кишинев, «Штинца», 1962, 146—154.
 42. С. В. Деянова, Э. А. Альфтан. Новые литые микропровода с высоким удельным электросопротивлением. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 117—121.
 43. Ю. И. Аввакумов. К вопросу о допустимом диаметре намотки микропровода в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VI. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1969, 221—228.
 44. Н. Р. Берман, М. В. Гивельберг, В. Г. Чебан. Прочность микропровода при кручении. Изв. АН МССР, серия физико-технических и математических наук, 1971, № 3, 75—77.
 45. Ю. И. Аввакумов. Кручение микропровода при безынерционной смотке. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 206—214.
 46. Е. Я. Бадинтер, С. И. Балабан, З. И. Зеликовский, А. Б. Ренский. Тензочувствительность литых микропроводов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. III. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965, 100—106.
 47. С. И. Балабан, Е. Я. Бадинтер, М. В. Соловьева. Исследование микропроводов из никельхромкремниевых сплавов для высокотемпературных тензорезисторов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VI. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1969, 159—162.
 48. Э. А. Альфтан, В. С. Меськин. Новые литые микропровода из сплавов сопротивления. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 3. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965, 89—99.
 49. Ю. И. Аввакумов. О коэффициенте трения микропровода в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 161—166.

50. В. Ф. Трусов. Обработка микропроводов в стеклянной изоляции плавиковой кислотой. Вопросы радиоэлектроники, серия «Детали и компоненты аппаратуры», вып. 10, 1964, 117—124.
51. Е. М. Лопатина, Б. В. Фармаковский, В. И. Вахрамеев. Упрочнение литых микропроводов после их получения. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VII. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1970, 75—83.
52. Е. Я. Бадинтер, С. И. Балабан, З. И. Зеликовский. Определение температурного коэффициента расширения литых микропроводов в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. II. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1964, 41—53.
53. А. А. Буренина, И. М. Касаткина, Н. Я. Карасик, В. П. Матвеев, Н. Е. Фаддеева. К вопросу о характере сцепления металла со стеклом в условиях литья медного микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 5. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 58—65.
54. Н. Е. Фаддеева, А. М. Фирсов, Н. Я. Карасик. К вопросу о характере сцепления стекло—металл в микропроводах с жилой из золота. Электронная техника, серия 9, вып. 2, 1968, 74—80.
55. Н. Е. Фаддеева, Н. Я. Карасик, А. М. Фирсов, Э. А. Альфтан. Электронномикроскопическое исследование структуры литых микропроводов с жилой из сплавов сопротивления. Электронная техника, серия 9, вып. 1, 1967, 89—95.
56. Е. Я. Бадинтер, З. И. Зеликовский, Н. Я. Карасик, Н. Е. Фаддеева. Структура переходного слоя и изменение электрического сопротивления литых микропроводов во времени. Электронная техника, серия 14, вып. 3, 1970, 78—90.
57. В. В. Трояновский. Развитие метода изготовления сверхтонких проволок непосредственно из жидкого металла. Достижения в области разработки, производства и применения микропроволоки в стеклянной изоляции. М., ЦИНТИ Электропром, 1962.
58. В. Н. Милаевская. Электронномикроскопическое исследование микропроволоки. Достижения в области разработки, производства и применения микропроволоки в стеклянной изоляции. М., ЦИНТИ Электропром, 1962.
59. С. Н. Димитраки, З. И. Зеликовский. Влияние нагрева при намотке по заданному сопротивлению резисторов из остеклованного микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 4. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 263—270.

ГЛАВА VI

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИКРОПРОВОДА

Возможность широкого применения микропроводов связана со степенью изученности их свойств и в первую очередь электрических.

Рассмотренные технологические особенности литья микропровода и поведение металлов и сплавов в процессе литья показывают, что на свойства микропровода влияют многие технологические факторы и кроме того свойства исходных материалов. Исследовать влияние каждого из них на свойства микропровода не всегда возможно. В связи с этим при изучении параметров микропровода приходится рассматривать суммарный эффект воздействия на них нескольких факторов. Это приводит к необходимости применения экспериментально-статистических методов исследования, которые, как известно, позволяют характеризовать подобные суммарные воздействия статистическими характеристиками.

К свойствам микропровода, которые представляют интерес при конструировании элементов приборостроения, радиоэлектроники, счетно-вычислительной техники, в первую очередь относятся погонное сопротивление, общее сопротивление отрезка микропровода на бобине и его неравномерность по длине, температурный коэффициент сопротивления, ток плавления, электрические свойства изоляции и др., а также временная стабильность свойств при воздействии различных эксплуатационных факторов.

§ 1. Удельное и погонное сопротивления

Удельное и погонное сопротивления микропровода являются важными, а в некоторых случаях решающими параметрами при создании на его основе различных элементов и приборов.

Удельное сопротивление ρ жилы микропровода в основном определяется удельным сопротивлением металлов и сплавов, из которых

освоено производство микропровода. В табл. 1 приведены сравнительные значения ρ некоторых исходных металлов и микропроводов из них при температуре 20°C [1—3]. Из приведенных данных ρ жилы микропровода отличается от ρ исходного металла, увеличиваясь в некоторых случаях более чем на 50%.

Таблица 1

Удельное сопротивление микропровода из некоторых металлов

Материалы жилы	ρ исходного металла, $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	ρ жилы МП, $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Изменения ρ , %
Медь	0,017	0,022	30
Серебро	0,016	0,020	25
Никель	0,073	0,090	23
Золото	0,024	0,035	46
Кобальт	0,064	0,080	25
Палладий	0,108	0,134	24
Платина	0,107	0,127	19
Железо	0,098	0,157	60
Свинец	0,206	0,270	31
Олово	0,115	0,190	65

Рост удельного сопротивления связан с изменением химического состава жилы в процессе литья, вызванным окислением металла, а также диффузией элементов из стекла в металл [4].

Основное влияние на рост удельного сопротивления медного микропровода оказывает наличие меднозакисного переходного слоя на границе проводник—изоляция. Ориентировочно (рис. 99) [4]

$$\rho_{\text{мп}} = \frac{\rho_{\text{ж}}}{\left(1 + \frac{2h}{d}\right)^2},$$

где $\rho_{\text{мп}}$ — удельное сопротивление микропровода, $\rho_{\text{ж}}$ — удельное сопротивление жилы, h — толщина переходного слоя, d — диаметр жилы. На величину удельного сопротивления медного микропровода оказывает влияние также стеклянная изоляция. По-видимому, на неё, кроме того, влияет структура жилы микропровода, которая зависит, как и удельное сопротивление, от диаметра жилы. У микропровода с $d < 70$ мкм наблюдается ветвистая структура, при $70 \text{ мкм} < d < 170$ мкм — смешанная, а при $d > 170$ мкм — ячеистая [4, 5]. Данные об удельном сопротивлении медного микропровода расходятся с результатами исследования этого параметра, проведенными в Англии [6], где установлено, что при $d < 15$ мкм ρ не изменяется и несколько выше нормального, когда $d > 15$ мкм.

Удельное сопротивление микропровода из сплавов сопротивления определяется номенклатурой сплавов, из которых освоено его литье. В табл. 2 собраны значения удельного сопротивления микропроводов из сплавов сопротивления, разработанных для фильерного способа

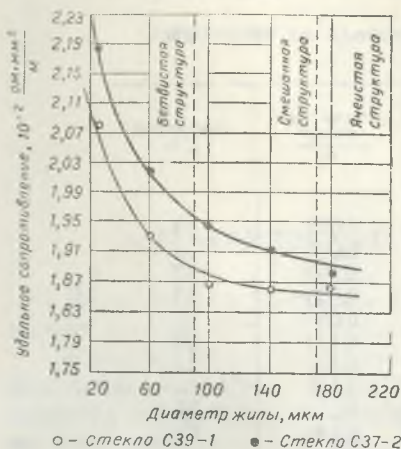


Рис. 99. Изменение удельного сопротивления медного микропровода при изменении d

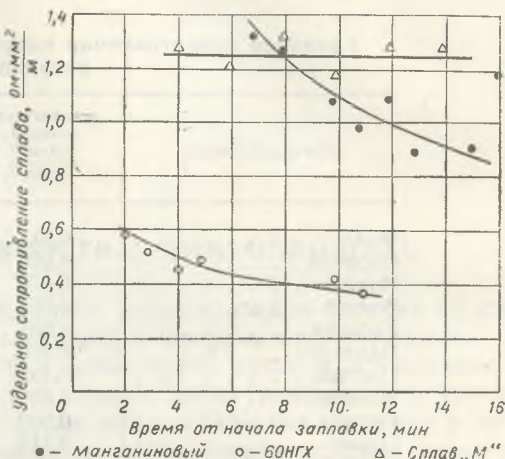


Рис. 100. Изменение удельного сопротивления сплавов в процессе литья микропровода

производства проволок (например, манганина) и литевых сплавов, композиции которых выбраны с учетом технологических особенностей процесса литья [7—12].

Физико-химические процессы в микрованне в этом случае, как и при литье микропровода из чистых металлов, приводят к изменению удельного сопротивления жилы, особенно это относится к фильерным

Таблица 2
Средние значения удельного сопротивления микропроводов из некоторых сплавов сопротивления

Материал жилы	$\rho_{мп}, \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Материал жилы	$\rho_{мп}, \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$
Манганин	0,5	К50ГХ	1,6
60НГХ	1,2	К37ГХ	1,7
63НГХ	1,2	52КХС	1,8
72НХГС	1,3	53КХГС	2,0
Сплав „М“	1,4	55КХГС	2,7
К80ХС	1,4	Н42ДГ	1,0
МНК-40	0,5	Н44ДГ	1,0
К40ГХ	2,0	МОМЦ4-9	0,4

сплавом (рис. 100) [13]. Например, динамика химического состава манганина в процессе литья микропровода описывается следующим образом [14]: после заправки к моменту начала процесса (2,5 мин) содержание марганца снижается от 11,5 до 8,5% и продолжает изменяться в процессе литья, но в меньшей мере; концентрация Ni изменяется с 3,3 до 2,9%. Одновременно с процессами окисления и испарения протекает процесс диффузии элементов стекла Fe, Si, Pb в манганин. Что касается литевых сплавов, то они ведут себя более стабильно.

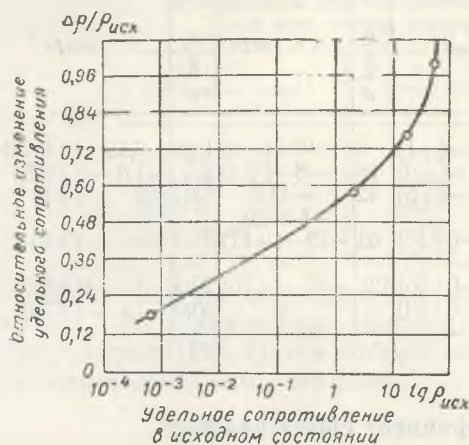


Рис. 101. Зависимость относительного изменения удельного сопротивления германиевого микропровода от удельного сопротивления германия

В микропроводе из германия изменение удельного сопротивления (рис. 101) связывают с обогащением жилы кислородом [15]. Наряду с влиянием указанных факторов, которые дестабилизируют ρ , в процессе литья микропровода изменяется и диаметр жилы. Поэтому микропровода, используемые в качестве резистивных материалов, обычно характеризуются совокупным параметром — погонным сопротивлением r .

Согласно действующим техническим условиям микропровода из сплавов сопротивления в зависимости от r делятся на группы. Неравномерность погонного сопротивления нормируется как разность по r между концом и началом отрезка микропровода или как допускаемые на нем отклонения Δr от номинального значения погонного сопротивления. Для манганинового микропровода также указывается минимальное общее сопротивление отрезка микропровода на бобине R , а для микропровода из других сплавов длина отрезка на бобине, например, для микропровода из сплава 72НХГС длина устанавливается не менее 300 м. В табл. 3 [9, 11, 16—18] представлены группы микропровода по погонному сопротивлению для некоторых сплавов сопротивления. Экспериментально-статистические исследования показали, что r литых микропроводов отдельных бобин распределяются по закону Пуассона [7]:

$$\varphi(x) = \frac{1}{a} 4x \exp(-2x),$$

где $x = \frac{\alpha}{a_i}$ — отношение среднего значения параметра к его мгновенному значению.

Таблица 3

Группы микропроводов по погонному сопротивлению для некоторых сплавов

Группа микропровода	Манганин			72НХГС		60НГХ		52ХКС		Сплав „М“		МНК-40	
	r , ком/м	Δr , ком/м	R , Мом	r , ком/м	Δr , ком/м	r , ком/м	Δr , ком/м	r , ком/м	Δr , ком/м	r , ком/м	Δr , ком/м	r , ком/м	Δr , ком/м
1	1,5—2,9	2	0,2	5	$\pm 1,75$	10	$\pm 3,5$	5	-2—(+1)	8	-3—(-0)	1,25	-0,55—(+0,25)
2	3—5	4	1	10	$\pm 3,50$	20	$\pm 7,0$	10	-4—(-0)	16	-8—(+4)	2,5	-1,0—(+0,5)
3	5—10	10	4	20	$\pm 7,00$	40	$\pm 14,0$	20	-10—(+5)	32	-11,5—(+8,5)	5,0	-2—(+1)
4	10—14	14	11	40	$\pm 14,00$	80	$\pm 28,0$	40	-15—(+10)	63	-23—(+17)	10,0	-4—(+6)
4а	14—20	20	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	20—40	30	24	80	$\pm 28,00$	160	± 64	80	-30—(+20)	125	-35—(+75)	20,0	-7—(+5)
6	40—70	30	30	—	—	—	—	160	-60—(+90)	—	—	40,0	-15—(+30)
7	70—150	50	55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

§ 2. Температурный коэффициент сопротивления

Под температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) в заданном интервале температур понимают пересчитанное на 1 градус относительное изменение сопротивления, вызванное изменением температуры от t_1 до t_2 и определяемое по формуле

$$\text{ТКС}(t_2, t_1) = \frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)},$$

где R_1 — сопротивление при t_1 , R_2 — сопротивление при t_2 ; ТКС микропровода из металлов, также как и удельное сопротивление, в процессе литья изменяется. Причины, вызывающие изменение ТКС и ρ , идентичны. Следует отметить, что ТКС микропроводов из металлов изу-

Таблица 4

ТКС микропроводов с жилой из некоторых металлов

Материалы жилы	ТКС металла 1/град·10 ⁶	ТКС микропро- вода 1/град·10 ⁶	Материалы жилы	ТКС металла 1/град·10 ⁶	ТКС микропро- вода 1/град·10 ⁶
Медь	4200	3000	Палладий	3700	2800
Серебро	4200	3000	Платина	3900	3300
Никель	6700	5000	Железо	6600	4000
Золото	3500	3200	Свинец	4200	3500
Кобальт	6600	4500	Олово	4400	3700

чен недостаточно. Можно указать только весьма ориентировочные значения ТКС микропровода из ряда металлов (табл. 4) [2]. ТКС микропроводов из металлов в процессе литья уменьшаются до 40%.

Таблица 5

Средние значения, среднеквадратичные отклонения и погонная неравномерность ТКС микропровода из некоторых сплавов сопротивления

Материалы жилы	$\bar{\alpha}$, 1/град·10 ⁶	σ_{α} , 1/град·10 ⁶	Δ (ТКС), %/100м
МНМц 3—12	-30	20	15
60НГХ	-40	30	20
63НГХ	+20	10	15
Сплав „М“	-15	10	5

В Англии при исследовании медного микропровода установлено, что его ТКС в диапазоне температур 20—240°C составляет 2300×10^{-6} 1/град [18]. Путем отбора можно получить микропровод с ТКС, близким к исходным металлам.

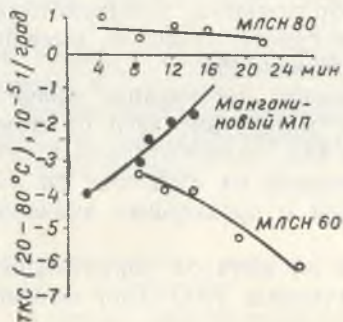


Рис. 102. Изменение ТКС микропровода из сплавов сопротивления в процессе литья (на горизонтальной оси отложено время выдержки)

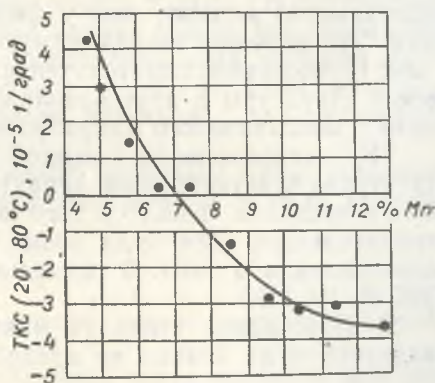


Рис. 103. Зависимость ТКС мanganного микропровода от содержания марганца в жиле

ТКС микропровода из сплавов сопротивления распределяется по нормальному закону и характеризуется средним значением α и среднеквадратичным отклонением σ_{α} . Кроме этих характеристик погонную неравномерность ТКС определяют также на отрезке микропровода длиной 100 м Δ (ТКС) (табл. 5) [7]. Изменения ТКС (рис. 102) наи-

более существенны для микропроводов из фильерных сплавов, химический состав которых в процессе литья претерпевает изменения. Подтверждением этого служит зависимость ТКС манганинового микропровода от содержания марганца в жиле (рис. 103) [19]. ТКС микропро-

Таблица 6

Значения ТКС микропроводов из литевых сплавов

Материал жилы	Температурный диапазон, °С	ТКС, 1/град·10 ⁶
72НХГС	-60-(+155)	не более ±50
К80ХС	-60-(+155)	не более ±50
МНКНО	-60-(+155)	не более ±50
К40ГХ	+20-(+500)	не более ±50
К50ГХ	-20-(+155)	+20-(+50)
К37ГХ	-60-(+155)	не более ±20
52КХС	-60-(+160)	-15-(+15)
53КХГС	-60-(+160)	-15-(+15)
55КХГС	+20-(+160)	-150-(-350)
Н42ДГ	-60-(+155)	-50-(+30)
Н44ДГ	-60-(+100)	-30-(+50)
МОМЦ 4-9	-60-(+160)	-25-(+25)

вода заметно меньше, чем у фильерных проволок из того же манганина. Это явление, по-видимому, связано с тем, что у микропроводов с $d < 14$ мкм наблюдается тенденция к образованию монокристаллической структуры в противоположность поликристаллической, имеющей место у манганинового микропровода с $d > 14$ мкм [6].

ТКС микропровода с жилой определенного материала является структурно-чувствительной характеристикой, вследствие чего он может быть в пределах одного и того же отрезка как положительным, так и отрицательным. Для ряда новых микропроводов из литевых сплавов сопротивления в табл. 6 приведены сведения о предельных значениях ТКС [8, 10, 11].

В технических условиях микропровода из сплавов сопротивления разделяются на классы по предельным значениям ТКС. Для мангани-

Таблица 7

Классы ТКС микропроводов из сплавов сопротивления

Материал жилы	Класс ТКС, 1/град·10 ⁶			Температурный диапазон, °С
	А	Б	В	
Манганин	±12	±25	±50	+20 -(+80)
60НГХ	0 -(+30)	-30-(+50)	0 -(-50)	-60 -(+155)

на и сплава 60НГХ установлены три класса, которые приведены в табл. 7 [9, 17, 19].

Различие в химическом составе стекол С39-1, ЗС-11 и С37-2 не оказывает заметного влияния на ТКС [19]. В то же время ТКС микропровода [20] зависит от толщины стеклянной изоляции:

$$\text{ТКС}_{\text{мп}} = \text{ТКС}_{\text{ж}} + \frac{(\beta_{\text{ст}} - \beta_{\text{ж}}) S}{1 + \frac{E_{\text{ж}}}{E_{\text{ст}}(k^2 - 1)}}$$

где $\beta_{\text{ст}}$ и $\beta_{\text{ж}}$ — температурные коэффициенты расширения стекла и жилы, $E_{\text{ст}}$ и $E_{\text{ж}}$ — модули упругости стекла и жилы, S — коэффициент тензочувствительности микропровода.

Другой интересный вопрос связан с выяснением статистических зависимостей между погонным сопротивлением и ТКС отрезка микропровода [45].

Известно, что погонное сопротивление и ТКС микропровода при прочих равных условиях определяются соответствующими параметрами исходных материалов. Однако для микропроводов в связи со значительным изменением химического состава жилы эта зависимость, естественно, не сохраняется как интегрально (для больших отрезков), так и в точке (для малых). Поэтому для микропровода связь между погонным сопротивлением и ТКС может носить только статистический характер. В этом случае корреляционный анализ ставит две проблемы: проблему формы связи, состоящую в определении вида функции $y_x = f(x)$ по данной корреляционной таблице; проблему силы или тесноты связи, т. е. оценку степени рассеяния значений y для различных значений x .

Корреляционное уравнение связи между погонным сопротивлением отрезка и его температурным коэффициентом ищали в виде полинома второй степени:

$$\alpha_r = ar^2 + br + c.$$

Для определения коэффициентов уравнения применялся метод наименьших квадратов.

В случае параболической корреляционной связи вводится еще параболический коэффициент регрессии

$$\eta' = \frac{\sigma(\alpha_r)}{\sigma_\alpha}$$

здесь

$$\sigma^2(\alpha_r) = \frac{1}{N} \sum_i (\bar{\alpha}_r - \bar{\alpha})^2,$$

$$\sigma_\alpha^2 = \frac{1}{N} \sum_i (\alpha_i - \bar{\alpha})^2,$$

где $\sigma^2(\alpha_r)$ — дисперсия расчетных значений $\bar{\alpha}_r$, полученных из уравнения параболы при каждом r около средней $\bar{\alpha}$; σ_α^2 — обычная дисперсия α ; N — число измерений. Коэффициент регрессии является показателем тесноты связи, учитывающим именно данную форму связи.

Более общей мерой тесноты корреляционной связи является корреляционное отношение, под которым понимается отношение межгруппового среднеквадратического отклонения переменной x к общему среднему квадратическому отклонению этой переменной:

$$\eta = \frac{\sigma_x}{\sigma_x} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{x}_j - \bar{x})^2 n_{yj}}{\sum_{i=1}^s (x_i - \bar{x})^2 n_{xi}}}$$

где \bar{x}_j — среднее арифметическое значение варианта x из всех значений, соответствующих данному y ; n_{yj} — число вариант x при данном y ; n — число различных значений y ; \bar{x} — среднее арифметическое значение x ; S — отдельная варианта случайной величины x ; x_i — число одинаковых значений x в i -том случае; n_{xi} — число неповторяющихся значений x .

Таблица 8

Параметры корреляционной связи между α и R на бобине манганинового микропровода

a	b	c	η'	η
0	0,006	-1,464	0,1695	0,1724
0,013	-0,367	1,436	0,339	0,347
0	-0,003	-2,991	0,12	0,12
0	-0,001	-3,449	0,105	0,105
0	-0,002	-3,446	0,155	0,155
-0,0001	0,001	-4,271	0,17	0,021
0	-0,159	-0,735	0,05	0,059
0	-0,006	-1,410	0,116	0,12
0,021	-0,873	-0,314	0,335	0,335
0	-0,002	-2,771	0,121	0,121
0	0,001	1,072	0,18	0,193
0	-0,005	-1,277	0,178	0,18
-0,001	3,071	-1,191	0,072	0,082
0	0,0001	-1,038	0,007	0,007
0,002	0,114	1,360	0,213	0,260
0	0,007	1,366	0,136	0,136
0,002	-0,159	1,735	0,05	0,059
0,001	-0,065	-1,770	0,135	0,138
0,001	-0,046	-1,186	0,11	0,143
0	-0,005	2,748	0,026	0,029

Корреляционная связь между α и R исследовалась на 21 бобине манганинового микропровода, принадлежащих различным группам и отобранным в производственных условиях по таблице случайных чисел. На каждой бобине на 1000 последовательных отрезках микропровода длиной 100 мм производилось измерение ТКС и погонного сопротивления на установке УТКС-2. Полученные результаты по специальной программе обрабатывались на ЭВЦМ БЭСМ-2М. Результаты обработки представлены в табл. 8.

Для вычисления средней ошибки корреляционного отношения используем формулу

$$m_{\eta} = \pm \frac{1 + \eta^2}{\sqrt{n}}$$

Тогда достоверность корреляционного отношения можно оценить неравенством

$$\frac{n}{m_{\eta}} \geq 4.$$

Отсюда найдем, что правильными будут те η , которые удовлетворяют неравенству

$$4\eta^2 + \eta\sqrt{n} - 4 \geq 0.$$

В этом случае $n=1000$ и, следовательно, достоверными будут все η , большие 0,125. Отметим, что это значение граничного η получено без учета погрешностей эксперимента.

В принципе можно считать, что если между ТКС и погонным сопротивлением отрезка и имеется корреляционная зависимость, то она очень слаба. Дело в том, что при $n=100$ граничное значение $\eta=0,375$, а сами η' из табл. 8 не претерпевают существенных изменений. Отсюда можно сделать вывод, что учет погрешностей эксперимента значительно увеличивает граничное значение η .

§ 3. Термоэлектродвижущая сила

Термоэлектродвижущая сила (ТЭДС) микропроводов изучалась в основном по отношению к меди при температурах до 600°C. По данным [7, 11] ТЭДС микропроводов из манганина, сплавов 60НГХ, 63НГХ и сплава „М” не превышает 5 мкв/град в интервале температур от 20 до 200°C; у микропроводов из сплавов К40ГХ, К37ГХ и К80ХС она находится в пределах 5—8 мкв/град в диапазоне температур 20—500°C; из 52КХС, 53КХГС и 55КХГС — не более 6—10 мкв/град. Особое место по ТЭДС занимает микропровод из сплава МНК-40, ко-

торый был разработан для термопар. ТЭДС у него достигает 35—55 мкв/град. ТЭДС микропроводов из медно-никелевых сплавов существенно зависит от содержания в них кремния (рис. 104) [26]. При содержании кремния 0,5—1% ТЭДС достигает 40 мкв/град. С увеличением содержания кремния от 1 до 3% ТЭДС уменьшается по абсолютной величине линейно. Исследования микропроводов из медно-никелевых сплавов с 0,5 и 1% кремния при температурах от 20 до 600°C (с измерением ТЭДС через каждые 50°C) показали, что с повышением температуры ТЭДС возрастает, достигая при 600°C величины от 50 до 55 мкв/град.

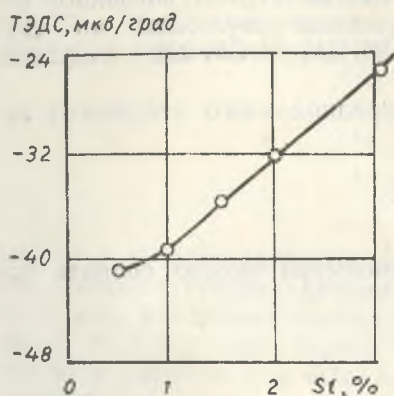


Рис. 104. Влияние содержания кремния на величину ТЭДС микропровода из медно-никелевых сплавов

§ 4. Электрическая прочность стеклянной изоляции

Исследование электрической прочности изоляции проводилось на микропроводах в изоляции из стекла типа С39-1 (нонекс), П-15, (ТУ) и ЗС-111 (рис. 105 и 106) [26]. Пробивное напряжение для исследованных стекол на постоянном токе выше, чем на переменном, при этом наибольшим значением пробивного напряжения на постоянном токе обладает изоляция из стекла С39-1, наименьшим — из П-15. На переменном токе с уменьшением толщины изоляции пробивания напряженность возрастает и, например, при $\Delta_{из} = 5$ мкм составляет 370—500 кв/мм. Для расчета пробивной напряженности $E_{пр}$ используется приближенная модель — цилиндрический электрод, параллельный плоскому, окружающее пространство — стекло, для которого

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{\Delta_{из}} M,$$

где

$$M = \frac{1}{\sqrt{k^2-1} - k + 1} + \frac{1}{\sqrt{k^2-1} + k - 1},$$

$$L_n \frac{\sqrt{k^2-1} + k - 1}{\sqrt{k^2-1} - k + 1}$$

$U_{пр}$ — пробивное напряжение, $\Delta_{из}$ — толщина изоляции,

$$k = \frac{D}{d}$$

Для стекла С39-1, например, на постоянном токе при нормальной температуре и кратковременном приложении напряжения ориентировочно [28] $U_{пр} = 0,7\Delta_{из}$, а пробивная напряженность составит

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{\Delta_{из}} = 700 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$$

При длительном приложении напряжения на переменном токе и в широком диапазоне температур (до 120°C) $E_{пр}$ снижается примерно в 10 раз и составляет 70 кВ/мм. Стремление повысить электрическую прочность путем увеличения изоляции не всегда приводит к желае-

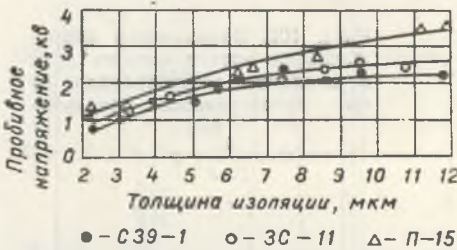


Рис. 105. Зависимость пробивного напряжения стеклянной изоляции от ее толщины на переменном токе

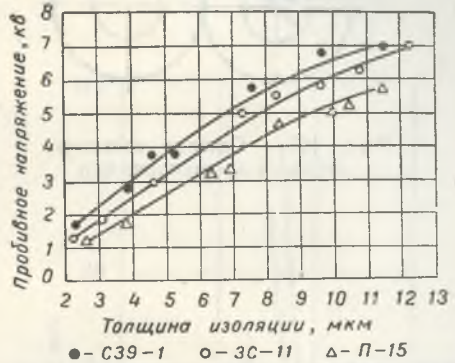


Рис. 106. Зависимость пробивного напряжения стеклянной изоляции от ее толщины на постоянном токе

мым результатам. Электрическая прочность стеклянной изоляции определяется соотношениями геометрических размеров микропровода. Практический интерес представляют три случая: постоянство толщины изоляции ($D - d = \text{const}$), постоянство диаметра жилы микропровода ($d = \text{const}$) и постоянство диаметра микропровода по изоляции ($D = \text{const}$) при переменном отношении $k = \frac{D}{d}$.

Для решения задачи рассматривается микропровод в виде двух проводящих цилиндров диаметром d , покрытых сплошной изоляцией диаметром D , к которым приложено напряжение U_0 (рис. 107) [28]. При этом принимается, что цилиндры расположены в сплошной однородной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ_0 , близкой к диэлектрической проницаемости изоляции.

Напряженность электрического поля достигает своего максимального значения на поверхности электрода и равна

$$E_{\max} = \frac{U_0}{D-d} \cdot \frac{\sqrt{k^2-1}}{\ln[k + \sqrt{k^2-1}]} \quad (6.4.1)$$

Из (6.4.1) видно, что напряженность электрического поля зависит не только от величины приложенного напряжения U_0 , но также от геометрических параметров микропровода d и D . Зависимость максималь-

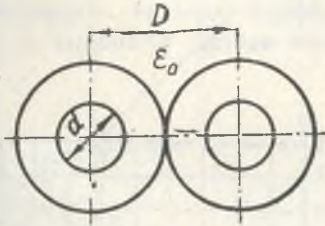


Рис. 107. Сечение соседних отрезков микропровода

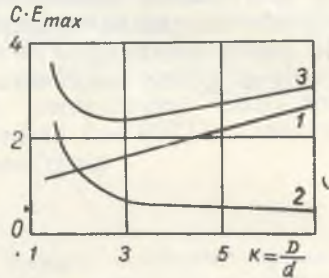


Рис. 108. Зависимость напряженности электрического поля в изоляции микропровода от его геометрических параметров:

$$1 - C = \frac{v_0}{D-d}; \quad 2 - C = \frac{v_0}{d}; \\ 3 - C = \frac{v_0}{D}$$

ной напряженности электрического поля от k , согласно (6.4.1), показана на рис. 108 (кривая 1). Как видно из графика, с ростом k напряженность электрического поля увеличивается. Это значит, что если толщина изоляции микропровода остается неизменной ($D-d = \text{const}$) и расстояние между близлежащими точками поверхности электродов не меняется, то напряженность поля растет только за счет уменьшения диаметра электродов. При этом уменьшается и D .

Разделив числитель и знаменатель выражения (6.4.1) на d после преобразования, получим выражение, удобное для рассмотрения максимальной напряженности электрического поля в случае $d = \text{const}$:

$$E_{\max} = \frac{U_0}{d} \cdot \frac{\sqrt{\frac{k+1}{k-1}}}{\ln(k + \sqrt{k^2-1})} \quad (6.4.2)$$

По кривой 2 (рис. 108) видно, что для этого случая с ростом k за счет увеличения D напряженность поля монотонно падает. Когда

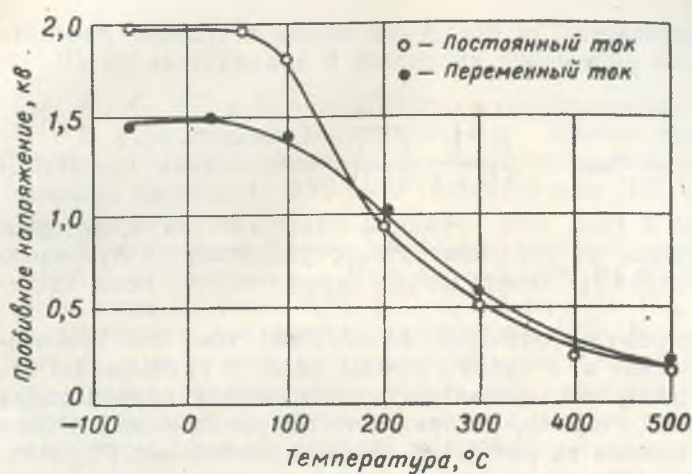


Рис. 109. Зависимость пробивного напряжения изоляции из стекла С39-1 микропровода с жилой из меди от температуры

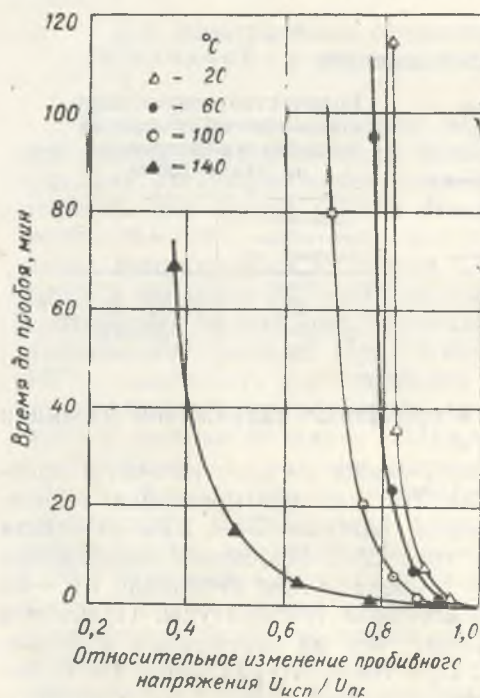


Рис. 110. Зависимость времени до пробоя изоляции из стекла С39-1 от относительного изменения пробивного напряжения постоянного тока при различных температурах

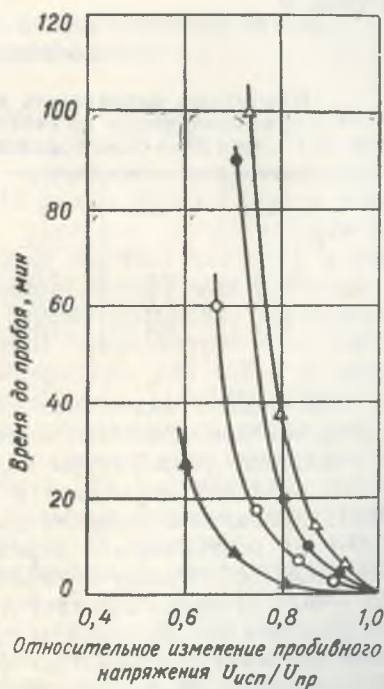


Рис. 111. Зависимость времени до пробоя изоляции из стекла С39-1 от относительного изменения пробивного напряжения переменного тока 50 гц при различных температурах

$D = \text{const}$, а k увеличивается за счет уменьшения d , удобно рассмотреть выражение после умножения числителя и знаменателя на D :

$$E_{\max} = \frac{U_0 k \sqrt{\frac{k+1}{k-1}}}{\ln(k + \sqrt{k^2 - 1})}. \quad (6.4.3)$$

Как видно из кривой 3 (рис. 108), функция имеет экстремум, который определяется графически из трансцендентного уравнения, полученного дифференцированием (6.4.3). Минимальная напряженность поля достигается при $k=2,9$.

Полученный экстремум физически объясняется тем, что увеличение k за счет уменьшения d , с одной стороны, ведет к уменьшению напряженности поля, ввиду увеличения расстояния между проводящими цилиндрами. С другой стороны, напряженность электрического поля растет за счет уменьшения их радиусов. Экспериментальные результаты, подтверждающие этот вывод при $D = \text{const}$ и разных d , приведены в табл. 9.

Таблица 9

Пробивные напряжения изоляции и микропровода из стекла С39-1 при $D = \text{const}$ и разных d

D , мкм	d , мкм	k	$U_{\text{пр}}$, кв
17,5	2,5	7,0	4,2
17,0	5,6	3,0	4,6
17,2	9,4	1,8	3,8

Таблица 10

Количество допустимых повреждений изоляции медного микропровода на длине 100 м

Количество точечных повреждений, шт	d , мкм
2	12—40
20	50—120
50	160—200

Из табл. 9 видно, что при $k=3$ пробивные напряжения изоляции выше, чем при остальных значениях d .

Влияние температуры окружающей среды на электрическую прочность изоляции изучалось в [29—32]. На рис. 109 приведена зависимость пробивного напряжения изоляции толщиной 3—4 мкм из стекла С39-1 на постоянном и переменном токе [29]. Пробивное напряжение остается практически неизменным в температурном интервале от -60 до $+50^\circ\text{C}$ и резко снижается с возрастанием температуры. Пробивное напряжение на постоянном токе больше, чем на переменном в диапазоне температур от -60 до $+150^\circ\text{C}$. При температурах выше 150°C оно не зависит от характера тока. Зависимость $U_{\text{пр}}$ и $E_{\text{пр}}$ от температуры имеет вид [30]:

$$\ln U_{\text{пр}} = A_1 + \frac{B_1}{T}$$

$$\ln E_{\text{пр}} = A_2 + \frac{B_2}{T},$$

где A_1 , A_2 , B_1 , и B_2 — постоянные коэффициенты, T — температура.

В нормативных документах $U_{\text{пр}}$ обычно указывают. Для манганинового микропровода на переменном токе частотой 50 гц изоляция должна выдержать 0,75 кв в течение 3 мин [16], а для медного микропровода — 1,5 кв [33].

Иностранные фирмы, например японская, приводят дифференцированные значения $U_{\text{пр}}$. Для $\Delta_{\text{из}} = 2,5; 6, 10, 14$ и 18 мкм, $U_{\text{пр}}$ соответственно не менее 0,75; 1, 2, 3 и 4 кв [34]. $U_{\text{пр}}$ зависит также и от длительности приложения напряжения [32]. Из рис. 110 и 111 видно, что с уменьшением испытательного напряжения и температуры время до пробоя увеличивается, кроме того, пробивное напряжение на переменном токе примерно в 2—3 раза меньше, чем на постоянном токе, при одном и том же времени до пробоя.

§ 5. Электрическое сопротивление, диэлектрические потери и проницаемость стеклоизоляции

Результаты исследования электрического сопротивления стеклянной изоляции микропровода приводятся в [35—38]. На рис. 112 представлена логарифмическая зависимость удельного сопротивления от температуры: $\lg \rho = f(10^4/T)$. Из рис. 112 видно, что в области температур 20—100°C при напряжении 105в удельное сопротивление изоляции микропровода из стекла С39-1 имеет высокие значения и находится в пределах 10^{17} — 10^{13} ом·см. С ростом напряжения удельное сопротивление падает, что, по-видимому, можно объяснить повышением подвижности ионов. При более высоких температурах — от 100 до 400°C зависимость сопротивления от температуры для С39-1 и других стеклоизоляций микропровода представлена рис. 113 [38]. После отжига в течение 40 мин и охлаждения микропровода со скоростью, не превышающей 1 град/мин, удельное сопротивление стеклоизоляции падает приблизительно на порядок. Из опыта [38] установлено, что при производстве микропровода закалке в большей степени подвергается более толстая изоляция. Например, закаленная изоляция из стекла С-39-1 толщиной 4 мкм обладает сопротивлением на один порядок больше, чем сопротивление изоляции толщиной 40 мкм. У отжженных микропроводов изоляция любой толщины из одного и того же стекла обладает примерно одинаковым удельным сопротивлением. Изучение поведения изоляции микропровода, помещенного в постоянное электрическое поле, при температуре, превышающей 300°C, позволило установить образование у ее поверхности тонкого (до 1 мкм) слоя SiO_2 , обедненного подвижными катионами, сопротивление которого на 2—3 порядка превышает сопротивление остальной массы стекла [36]. Влия-

ние этого процесса, так называемой формовки стекла, на увеличение сопротивления изоляции тем более значительно, чем меньше при прочих равных условиях толщина изоляции, так как тем больший объем изоляции будет обеднен подвижными катионами. На рис. 114 [36] при-

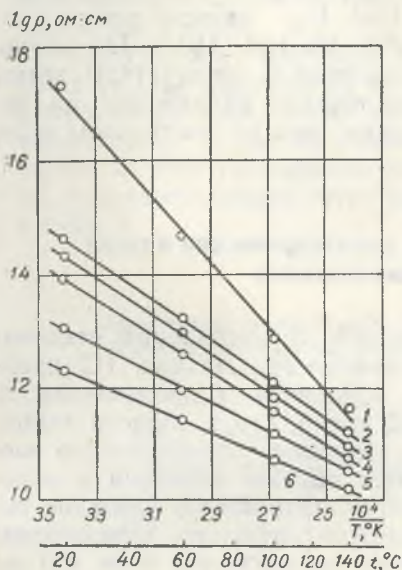


Рис. 112. Зависимость удельного электросопротивления изоляции микропровода из стекла С39-1 от температуры и приложенного напряжения (В):
 1 — 105; 2 — 600; 3 — 800; 4 — 1000;
 5 — 1200; 6 — 1400

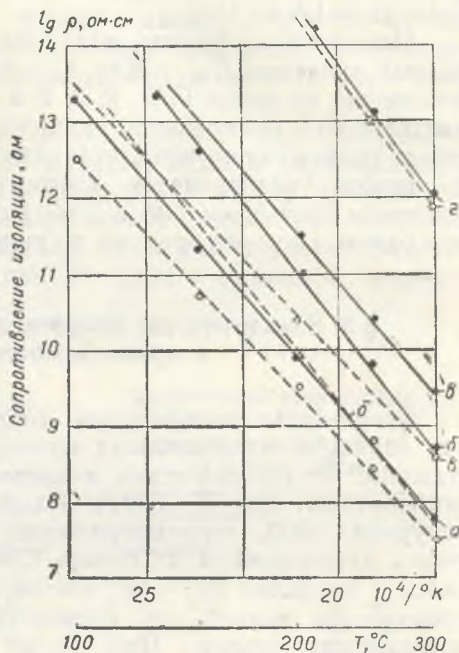


Рис. 113. Температурная зависимость сопротивления закаленной и отожженной стеклоизоляции:
 а — П-15, 13 мкм; б — ЗС-11, 7,5 мкм; в — С39-1, 1,4 мкм; г — № 40, 5 мкм; пунктирные линии — закаленная изоляция; сплошные — отожженная

водится сравнение температурных зависимостей сопротивления изоляции толщиной 5,0 мкм из различных марок стекол до и после формовки. Описанный процесс для стеклоизоляции необратим.

При -196°C сопротивление стеклянной изоляции остается на уровне 10^{13} ом, но при воздействии температур, превышающих 600°C , оно снижается до 10^6 ом [39]. В соответствии с техническими условиями на медный микропровод сопротивление стеклянной изоляции должно быть не менее 10^{10} ом, на этом уровне оно сохраняется после воздействия повышенной влажности воздуха 98% при 40°C , пониженной тем-

пературы -60°C , циклического воздействия температуры ($-60/+400^{\circ}\text{C}$), солнечной радиации и морского (соленого) тумана [33].

Диэлектрические потери $tg\delta$ и проницаемость ϵ стеклянной изоляции близки по величине соответствующим значениям исходных стекол.

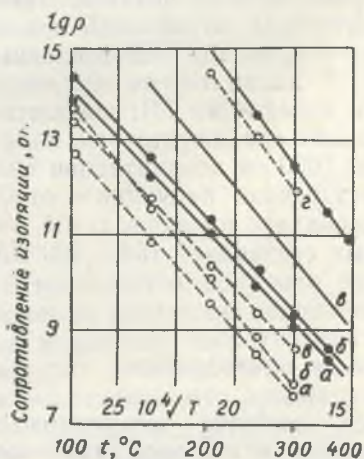


Рис. 114. Температурная зависимость сопротивления до и после формовки стеклоизоляции:

a — 17—15; *б* — 3С-11; *в* — С39-1; *г* — № 40. Пунктиром обозначена неотформованная изоляция

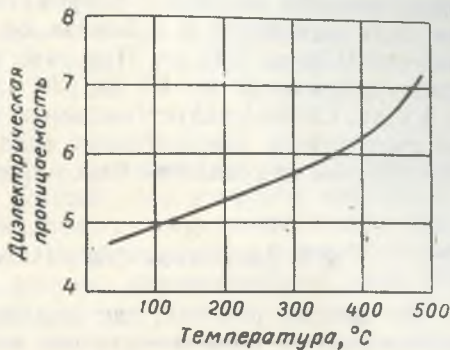


Рис. 115. Зависимость диэлектрической проницаемости стеклоизоляции от температуры

Чем выше частота, тем меньше $tg\delta$ зависит от температуры и тем меньше зависит от частоты, чем ниже температура. Диэлектрическая проницаемость изоляции может быть равной ϵ исходного стекла как по величине, так и по характеру температурно-частотной зависимости. $\epsilon_{ст}$, как и $tg\delta$, зависит от температуры тем в меньшей степени, чем выше частота. Зависимость $\epsilon=f(t)$ для изоляции из стекла С39-1 представлена рис. 115 [37].

Рассмотренные электрические свойства изоляции относились к микропроводам, у которых отсутствуют точечные повреждения изоляции. Иногда микропровода могут иметь точечные повреждения. Так, медные микропровода изготавливаются двух видов [33]. Микропровод первого вида не должен иметь точечных повреждений изоляции по всей длине, для второго — их число на длине 100 м не должно превышать указанного в табл. 10. Следует отметить, что микропровод с $d=160-200$ мкм изготавливается только второго вида. У этого микропровода $U_{пр}$ ниже, чем у первого, и после пребывания его при 400°C должно быть не менее 200 в, а после циклического воздействия температуры ($-60/+400^{\circ}\text{C}$) — 250 в для микропровода с $d=12-120$ мкм и 300 в с $d=160-200$ мкм. Рассматривая вопрос о точечных повреждениях,

интересно отметить, что циклическое воздействие температуры, по-видимому, не приводит к их увеличению. По данным [11] перенос микропровода из жидкого азота в кипящую воду не привел к нарушению целостности изоляции.

Одна из особенностей медных микропроводов — их незначительная магнитная восприимчивость. Количество магнитных загрязнений медных микропроводов в десятки раз меньше, чем у проводов, изготовленных фильерным способом. Вместе с тем имеется целая гамма микропроводов, которые обладают ферромагнитными свойствами [4]: коэрцитивная сила находится в пределах от 1,5 до 120 а/м, остаточная индукция — от 0,32 до 0,98 тл. При токе частотой 1000 гц коэрцитивная сила лежит в пределах от 80 до 520 а/м, а остаточная индукция — от 0,3 до 1,1 тл. Особо следует выделить микропровода с прямоугольной петлей гистерезиса, коэрцитивная сила которых составляет $150 \div 300$ а/м, а остаточная индукция не менее 0,5 тл.

§ 6. Временная стабильность свойств микропровода

Во многих работах, где анализируются свойства микропровода, подчеркивается возможность его использования в широком диапазоне температур.

Исследование изменения во времени электрического сопротивления

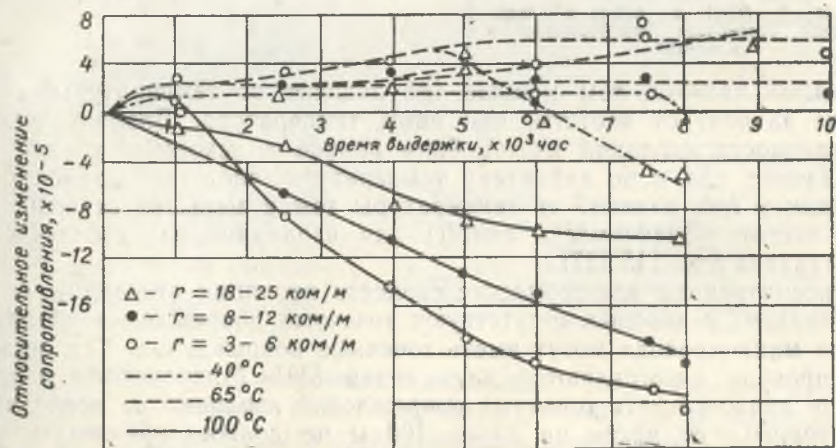


Рис. 116. Изменение электросопротивления манганинового микропровода с различным погонным сопротивлением

в процессе теплового воздействия проводилось на микропроводе в исходном состоянии и предварительно прошедшего термообработку. Уже отмечалась зависимость структуры микропровода от его диаметра. Это

Таблица 11

Изменение электросопротивления манганинового микропровода в зависимости от изоляции при температуре 100°C

Изоляция — тип стекла	Длительность воздействия температуры, час				
	500	1000	1500	2000	3000
С39-1 . . .	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26
П-15 . . .	0,90	1,22	1,28	1,36	1,40
АТ-24 . . .	1,40	1,22	1,38	1,40	1,38

обстоятельство побудило прежде всего остановиться на рассмотрении влияния погонного сопротивления, которое, как известно, связано с d , на изменение сопротивления манганинового микропровода при температурах от 40 до 100°C (рис. 116) [21]. Микропровод, использованный в исследованиях, предварительно прошел термообработку при 150°C

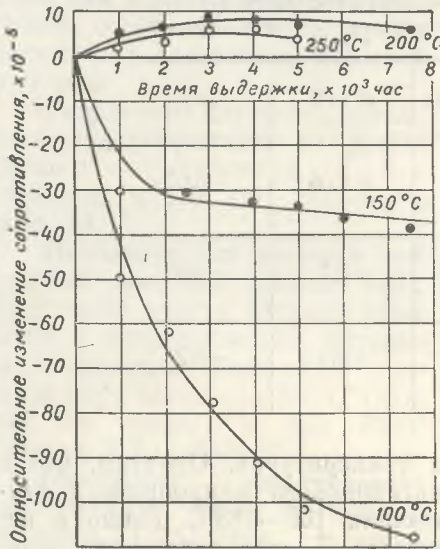


Рис. 117. Влияние режима термообработки на стабильность электросопротивления манганинового микропровода

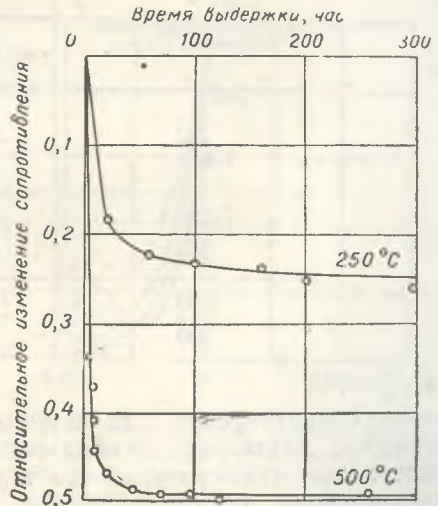


Рис. 118. Изменение электросопротивления манганинового микропровода в зависимости от времени воздействия температуры

в течение 100 часов. Из приведенных кривых следует, что влияние погонного сопротивления отчетливо проявляется при 100°C и минимальное изменение наблюдается у микропровода с $r=18-25$ ком/м, максимальное с $r=3-6$ ком/м. Если учесть, что монокристаллическую

структуру имеет микропровод с $d < 14$ мкм, которому соответствует для манганинового микропровода $r = 4$ ком/м, то полученные данные позволяют говорить о влиянии структуры микропровода на его стабильность при повышенных температурах. При изучении влияния предварительной термообработки на стабильность электрического сопротивления манганинового микропровода выявлено, что наибольшей стабильностью обладают микропровода, прошедшие термообработку при 200 и 250°C (рис. 117). Кроме отмеченных факторов, на стабильность манганинового микропровода в исходном состоянии оказывают влияние физико-химические свойства стекла, из которого изготовлена изоляция (табл. 11).

Таким образом, погонное сопротивление, характер предварительной термообработки, стеклянная изоляция — вот, по-видимому, далеко не полный перечень факторов, оказывающих влияние на степень изме-

Таблица 12

Изменение электросопротивления некоторых микропроводов из сплавов сопротивления [7]

Режим температурного воздействия, °С/час	δ R, %		
	МНМц 3-12	60 НГХ	„М“
$\frac{100}{100}$	-0,3	+0,05	-0,03
$\frac{150}{100}$	-0,5	+0,1	-0,05
$\frac{200}{100}$	-1,5	+0,3	-0,2

нения сопротивления при повышенных температурах. Отметим, что в основном длительная стабильность манганинового микропровода изучалась при температурах, не превышающих 100—125°C. Лишь в незначительном количестве работ сообщается о поведении манганинового микропровода при более высоких температурах. Из них в первую очередь следует назвать [22], где даны сведения о результатах изучения стабильности манганинового микропровода при температурах 250 и 500°C (рис. 118). Эксперименты показывают, что практически достаточная стабилизация, за которой следует незначительное изменение сопротивления во времени, наступает через 100 час при 250°C и 50 час при 500°C с изменением сопротивления до момента стабилизации в первом случае на 25% и во втором — на 50%.

Таблица 13

Изменение сопротивления микропроводов из сплавов сопротивления после выдержки в течение 100 часов при температурах 250 и 500°C

Материал жилы	Температура испытания, °C	
	250	500
	Δ R, %	
МНК-40	+0,035	+1,84
К40ГХ	+0,002	-1,10
К37ГХ	+0,086	+0,40
К80ХС	—	-2,70
52КХС	-0,015	-0,15 (75 час)
53КХГС	-0,014	-0,20 (75 час)

Что касается стабильности микропроводов из других сплавов, то представляется возможным показать только предельные изменения электрического сопротивления микропроводов, которые определены при воздействиях температур до 500°C. В табл. 12 эти изменения приведены для микропроводов из манганина и сплавов 60НГХ и «М», прошедших одинаковую термообработку.

Результаты изучения стабильности микропроводов из других сплавов сопротивления, опубликованные в [10, 11], сведены в табл. 13.

Используя для решения конкретных вопросов данные табл. 13, следует учесть, что они относятся к микропроводам, которые предварительно отжигались в течение двух часов при 500°C (данные 2-й графы) и при 600°C (данные 3-й графы).

Изменение сопротивления микропровода при длительном старении (складское хранение) из сплава 60НГХ не превышает 0,007% (рис. 119) [40]. Исследо-

вав влияние температуры и времени выдержки на изменение сопротивления установили, что для каждой температуры старения наблюдается степенная зависимость, удовлетворительно аппроксимируемая уравнением

$$\frac{\Delta R}{R} = a\tau^b.$$

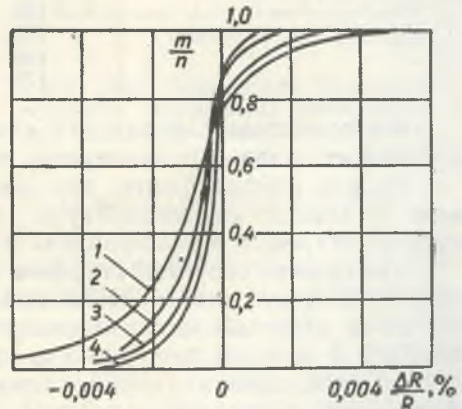


Рис. 119. Интегральные кривые распределения относительного изменения сопротивления микропровода из сплава 60НГХ при естественном старении (складское хранение):

1 — 20 000; 2 — 10 000; 3 — 5000; 4 — 1000 час

Таблица 14

Эмпирические зависимости изменения сопротивления микропровода при старении в условиях различных температур

Материал жилы	Температура старения, °С	Эмпирическая зависимость
60НГХ	180	0,004 τ 0,54
	200	0,015 τ 0,42
	225	0,031 τ 0,45
	250	0,056 τ 0,52
	300	1,135 τ 0,36
63НГХ	210	0,002 τ 0,76
	225	0,004 τ 0,74
	250	0,011 τ 0,67
	270	0,053 τ 0,64
	300	0,650 τ 0,44
	340	3,600 τ 0,36
Манганин	80	0,004 τ 0,40
	100	0,022 τ 0,26
	120	0,036 τ 0,29
	140	0,085 τ 0,28
	175	0,303 τ 0,25

Эмпирические зависимости изменения сопротивления при старении в условиях различных температур приведены в табл. 14 [40].

Можно предположить, что показатель степени в некотором диапазоне не зависит от температуры и характеризует физико-химический процесс старения, а коэффициент a — скорость процесса.

Увеличение скорости старения для микропроводов из сплава 60НГХ при 300°С и из сплава 63НГХ при 300 и 340°С происходит, по-видимому, из-за значительного изменения характера процесса старения. Коэффициент b в формулах для указанных температур существенно изменяется вследствие внутренних процессов, приводящих к резкому изменению скорости старения. В работе [40] приводится эмпирическая зависимость, характеризующая продолжительность старения, при которой сопротивление изменяется на определенную величину. Эта связь выражается

$$\tau = Ae^{Bt},$$

где A и B — коэффициенты, t — температура, °С.

Из графиков на рис. 120 и 121 следует, что срок старения микропровода существенно зависит от температуры и величины допускаемого изменения сопротивления. Для прогнозирования изменения сопротивления при хранении можно воспользоваться приведенными в [40] зависимостями типа $\frac{\Delta R}{R} = a\tau^b$ (табл. 15).

При исследовании влияния структуры на временную стабильность электрического сопротивления микропроводов из манганина и сплавов 63НГХ и «М», установлено [41], что между жилой и стеклянной изоляцией наблюдается окисная фаза в виде пленки переходного слоя.

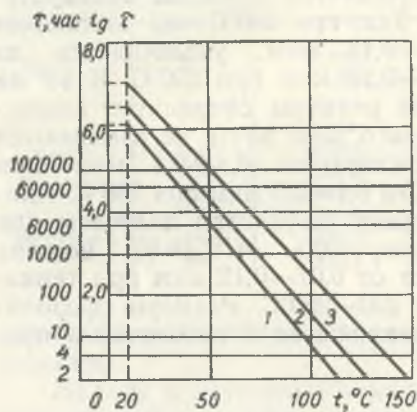


Рис. 120. Зависимость продолжительности старения от температуры для различных изменений сопротивления манганинового микропровода: 1 — 0,03; 2 — 0,05; 3 — 0,10%

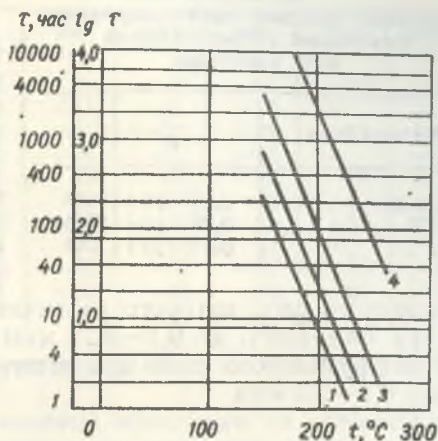


Рис. 121. Зависимость продолжительности старения от температуры для различных изменений сопротивления микропровода из сплава 63НГХ: 1 — 0,03; 2 — 0,05; 3 — 0,10; 4 — 0,50%

В стеклянной изоляции наблюдается диффузионный слой в виде сферолитовых частиц. При изучении величин переходного и диффузионного слоев установлено, что для микропроводов из сплава «М», испытанных при 65°C, ширина переходного слоя составляет 0,1 мкм и меньше, при температурных воздействиях порядка 120°C ширина переходного слоя лежит в пределах 0,1—0,2 мкм. Размеры сферолитов диффузионного слоя также несколько увеличиваются: от 0,1 в первом случае до 0,2—0,3 мкм во втором. Соответствующие величины для микропровода из сплава 63НГХ близки к данным по микропроводу из сплава «М». При исследовании манганинового микропровода после испытаний в тех же условиях установлено, что ширина переходного слоя увеличивается от 0,1—0,15 до 0,2—0,3 мкм, а размеры сферолитов диффузионного слоя — от 0,15 до 0,3 мкм. Полученные данные свидетельствуют о связи между стабильностью микропровода и величинами, характеризующими переходный и диффузионный слои. Эти величины, а также их зависимость от режима испытаний в случае микропроводов из сплавов 63НГХ и «М» меньше, чем для манганинового микропровода, у которого изме-

нение сопротивления во времени в 1,5—2 раза больше, чем у перечисленных.

Электронномикроскопическое исследование структуры и переходного слоя манганинового микропровода после различных температурных воздействий (табл. 11) показало, что ширина переходного слоя увеличивается с ростом температуры. Так, при 100°C она составляет 0,09—0,14 мкм, увеличиваясь до 0,14—0,28 мкм при 250°C. В то же время размеры сфероидов диффузионного слоя почти не изменяются и составляют 0,1—0,4 мкм при 100°C и 0,1—0,5 мкм при 250°C. Аналогичные результаты получены для микропровода МЛСН-80, ширина переходного слоя которого увеличивается от 0,07—0,12 мкм при температуре 100—150°C до 0,1—0,25 мкм при 200—250°C. Размеры сфероидов диффузионного слоя при этом не изменяются и находятся в пределах 0,1—0,3 мкм.

Таблица 15

Расчетные данные прогнозирования изменения сопротивления при хранении

Материал жилы	$\frac{\Delta R}{R} = a \cdot b$
Манганин	$0,49 \cdot 10^{-4} \tau^{0,506}$
60НГХ	$0,26 \cdot 10^{-4} \tau^{0,456}$
63НГХ	$0,88 \cdot 10^{-4} \tau^{1,130}$

переходного слоя которого увеличивается от 0,07—0,12 мкм при температуре 100—150°C до 0,1—0,25 мкм при 200—250°C. Размеры сфероидов диффузионного слоя при этом не изменяются и находятся в пределах 0,1—0,3 мкм.

Электронномикроскопическое исследование структуры и переходного слоя манганинового микропровода после различных температурных воздействий (табл. 11) показало, что ширина переходного слоя увеличивается с ростом температуры. Так, при 100°C она составляет 0,09—0,14 мкм, увеличиваясь до 0,14—0,28 мкм при 250°C. В то же время размеры сфероидов диффузионного слоя почти не изменяются и составляют 0,1—0,4 мкм при 100°C и 0,1—0,5 мкм при 250°C. Аналогичные результаты получены для микропровода МЛСН-80, ширина

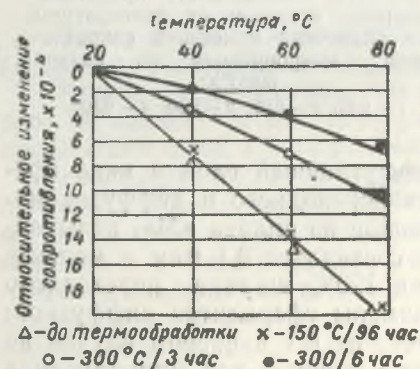


Рис. 122. Влияние режима термообработки на ТКС манганинового микропровода

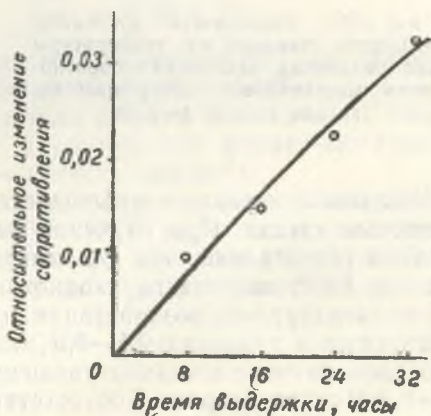


Рис. 123. Изменение электросопротивления медного микропровода при воздействии температуры 400°C

Сопоставляя результаты электронномикроскопического анализа с данными экспериментального исследования стабильности микропроводов при различных температурных воздействиях, следует отметить, что, по-видимому, на степень изменения сопротивления литого микропровода во времени кроме факторов, характерных для фильерного про-

Изменение ТКС микропровода из сплавов сопротивления в результате длительного хранения

Материал жилы	Погонное сопротивление, ком/м	Условия хранения	ТКС·10 ⁶ , 1/град (20 — 85°С)					
			время хранения, час					
			0	500	1000	5000	10 000	20 000
60НГХ	10	склад	-13	15	-17	-14	-12	-15
		поле	-12	-11	-11	-10	—	-12
	20	склад	-09	-11	-10	-21	-08	-10
		поле	-10	-08	-09	-08	—	-09
63НГХ	10	склад	17	19	13	18	15	15
		поле	19	19	15	10	—	12
	20	склад	06	07	05	05	06	05
		поле	14	13	10	11	—	12
Манганин	10	склад	-34	-32	-37	-32	-25	-29
		склад	-37	-38	-46	-32	-27	-30

да, оказывает влияние величина переходного слоя на границе жила—изоляция.

Наряду с изучением влияния тепловой обработки на стабильность микропровода из сплавов сопротивления исследовалось также изменение ТКС в зависимости от температурного воздействия и его длительности. Результаты, полученные при рассмотрении этого вопроса для манганинового микропровода, отражены на рис. 122 [23], из которого

Таблица 17

Изменение ТКС микропровода из сплавов сопротивления в результате температурного воздействия

Материал жилы	Температура старения, °С	ТКС·10 ⁶ , 1/град						
		продолжительность старения, час						
		0	12	48	100	200	500	1000
60НГХ	100	—	—	—	-9,0	—	-9,0	-10
	155	-9,0	—	—	-1,2	—	-1,0	-1,4
	200	-17	-18	—	-18	—	-20	-20
	240	-12	-13	-14	-13	—	—	—
	300	-11	—	-44	-51	-62	-83	-82
	100	14,0	15,0	—	14	16	16	16
63НГХ	155	8,0	8,0	—	7,0	8,0	8,0	—
	240	3,0	6,0	6,0	4,0	—	—	—
	300	7,0	-5,0	-9,0	-16	—	-2,2	—
	340	7,0	-2,1	-4,6	-7,5	-8,4	—	—
Манганин	175	-36	-37	—	-33	—	-35	-30
	240	-34	-30	-31	-29	-28	-25	-25
	300	-42	-38	-40	-40	-36	-34	-33

следует, что при воздействии температуры 150°C в течение 96 часов ТКС не изменяется. В то же время пребывание микропровода при 300°C позволяет изменить значение ТКС на один класс, а для микропровода класса «А» отмеченная тепловая обработка приводит к изменению знака ТКС и при соответствующем подборе его первоначального значения дает возможность получить близкую к нулю зависимость изменения сопротивления от температуры. Можно предположить, что одной из причин уменьшения ТКС после термообработки является устранение искажений кристаллической решетки жилы, возникшее в процессе литья вследствие интенсивного охлаждения, приводящего к фиксации высокотемпературного состояния микропровода.

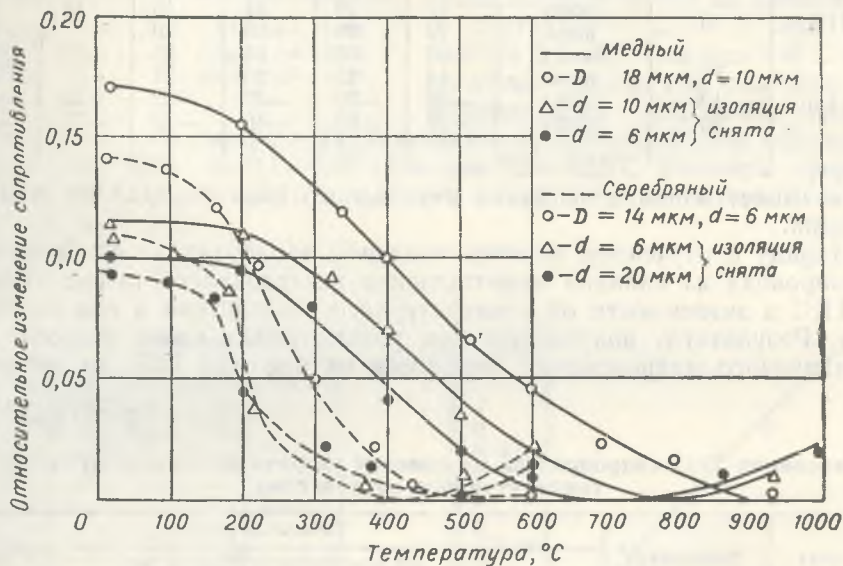


Рис. 124. Изменение электросопротивления медного и серебряного микропровода при воздействии положительных температур

В [18] обращается внимание на то, что ТКС манганинового микропровода имеет значительно меньшую величину, чем у лучших образцов провода, изготовленного фильерным способом. Так, в результате обработки при 450°C в течение четырех часов ТКС фактически уменьшается свое значение до нуля в диапазоне от 0 до 110°C , а для интервала температур $20\text{--}240^{\circ}\text{C}$ было получено среднее значение $6 \cdot 10^{-6}$ 1/град. ТКС микропровода из сплавов К40ГХ, К80ХС, 52КХС, 53КХГС после отжига при 300°C не отличается от ТКС в исходном состоянии [10, 11], но увеличивается в 2—2,5 раза после обработки при 500 или 700°C .

Результаты исследования длительного хранения и температурного воздействия на ТКС микропроводов приведены в табл. 16 и 17 [40].

Вопросы стабильности сопротивления микропровода из металлов рассмотрены только в [24, 25]. В первой работе сообщается об изменении сопротивления медного микропровода при 400°C. В частности, указывается, что после 32 часов пребывания при этой температуре сопротивление возрастает более чем на 3% (рис. 123). Во второй работе обсуждаются результаты изучения влияния изохронного отжига на медный и серебряный микропровода, а также на образцы из этих же металлов, с которых изоляция была стравлена плавиковой кислотой (рис. 124). Все образцы отжигались в вакууме порядка 10⁻⁴ мм рт. ст., длительность выдержки при каждой температуре была порядка 10 мин.

Анализируя причины уменьшения сопротивления при отжиге, можно прийти к выводу, что оно происходит в результате уменьшения дефектов кристаллического строения закаленного в процессе литья микропровода, а не за счет примесей, продиффундировавших в металл при высокой температуре из продуктов распада стекла, так как последние почти неподвижны в изученном интервале температур в течение использованного времени отжига. Некоторое увеличение сопротивления после выдержки при 500 и 800°C на отрезках без изоляции происходит за счет распыления образцов в вакууме.

Изучение воздействия отрицательных температур на микропровод проводилось на отрезках микропровода, намотанных на каркасы резисторов, что не позволило исключить влияние последних. В связи с этим не представляется возможным сообщить какие-либо данные о степени влияния низких температур на сам микропровод. Поэтому в табл. 18 приводятся некоторые результаты совместного влияния материала каркаса и отрицательных температур на манганиновый микропровод с натяжением при намотке на каркас порядка 5 мн [42].

Из табл. 18 видно, что сопротивление микропровода после первичного охлаждения становится стабильнее при вторичном воздействии отрицательных температур. Однако нагрев до 80°C после первого охлаждения вызывает значительные остаточные изменения, которые наблюдаются также и при следующим за нагреванием повторном охлаждении.

Исследование холодоустойчивости резисторов на основе микропровода из сплава «М» показали, что после воздействия температуры 60°C в течение 4 часов, а также трех температурных циклов (-50/+70°C) изменение сопротивления составляет не более 0,002%, что на порядок

Таблица 18

Предельные значения остаточных изменений сопротивления манганинового микропровода после выдержки при 70°C

Материал каркаса	Первое охлаждение (8 час)	Второе охлаждение (8 час)
	Изменение сопротивления × 10 ³ , %	
Кварц	40—100	2—5
Керамика	7—27	0—2
Стекло	1—12	0—2
Латунь	2—7	0—2

выше, чем у резисторов на основе манганинового микропровода [43].

Изучение влияния различных климатических факторов (температуры, влаги) при длительном воздействии на электрическую прочность изоляции [31] показало, что после пребывания микропровода в течение года при 20°C и относительной влажности 93% пробивное напряжение снижается вдвое и сохраняет свое значение, если хранение микропровода производится при температуре -10°C. В работе [29] определено, что тепловое старение изоляции из стекол С39-1 и П-15 при температурах до 300°C в течение 1000 часов не оказывает существенного влияния на пробивное напряжение, вызывая его уменьшение на 10—20%. После пребывания при 400°C пробивное напряжение снижается на 40—60%, а воздействие температуры 500°C в течение 100 часов приводит к растрескиванию изоляции, выражающемуся в образовании трещин, а в некоторых случаях в откалывании и отслаивании изоляции. В то же время воздействие указанных температур вплоть до 500°C в течение 100 часов не оказывает практического влияния на пробивное

Таблица 19

Испытательные напряжения изоляции медного микропровода после воздействия температуры

Продолжительность воздействия, час	d, мкм	Температура, °С			
		100	200	300	400
		U пр. кв (не менее)			
0,5 (кратковременное)	12—120	1,3	1,3	1,0	0,8
1000 (длительное)	12—120	1,3	0,7	0,5	0,25

напряжение изоляции. Стеклоанная изоляция медного микропровода после пребывания при повышенных температурах до 400°C должна выдерживать напряжение в соответствии с [33] согласно табл. 19. Трехкратное циклическое воздействие (-60/+400°C) снижает U пр до 1,3 кв.

В [40] за критерий временного изменения электрической прочности изоляции принято отношение $\frac{E}{E_0}$, где E — электрическая прочность после воздействия повышенных температур, E₀ — первоначальная электрическая прочность. Найденная по экспериментальным данным зависимость между этим критерием и временем τ имеет вид

$$\frac{E}{E_0} = ae^{b\tau} + c,$$

где a, b и c — коэффициенты, зависящие от температуры старения (табл. 20).

Из табл. 20 следует, что коэффициенты a и b не зависят от температуры старения, а значение c уменьшается с ее повышением и факти-

чески характеризует предельное значение электрической прочности. При $\tau \geq 1000$ час средняя величина относительной электрической прочности изоляции практически становится равной численному значению коэффициента c .

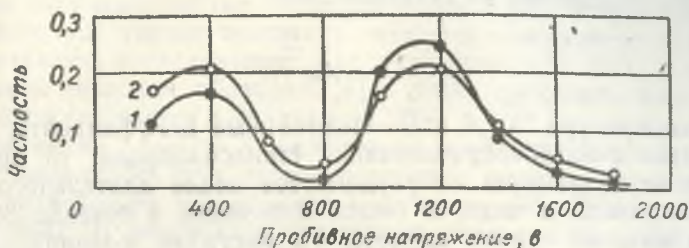


Рис. 125. Дифференциальная функция распределения пробивного напряжения изоляции микропровода из сплава 60НГХ при температуре 155°С:
1 — 1 час; 2 — 10 часов

Из рис. 125 [40], где приведена дифференциальная функция распределения пробивного напряжения видно, что она характеризуется двумя максимумами, связанными с влиянием на величину пробивного напряжения двух качественно разных факторов. Первый участок характеризует пробивное напряжение, обусловленное наличием микротрещин в стеклянной изоляции, которые под действием повышенных температур и фактора времени переходят из поверхностных в сквозные. Вто-

Таблица 20

Относительная электрическая прочность стеклоизоляции микропровода при различных температурах

Материал жилы	Температура старения, °С	$\frac{E}{E_0} = ae^{-b\tau} + c$
Cu	300	$26,8e^{-0,0045} + 72,7$
	325	$27,3e^{-0,0046} + 65$
	350	$24,8e^{-0,0044} + 57$
	375	$25,6e^{-0,0044} + 49$
	400	$25,0e^{-0,0044} + 42$
60НГХ	100	$27,9e^{-0,0065} + 70$
	125	$23,4e^{-0,0065} + 62$
	155	$24,9e^{-0,0063} + 54$
	175	$22,9e^{-0,0063} + 48$
	200	$24,0e^{-0,0063} + 44$
	250	$27,7e^{-0,0066} + 38$

Таблица 21

Зависимость продолжительности термообработки изоляции микропровода

Заданное изменение электрической прочности, % для 60НГХ	$\lg T = A + \frac{B}{T}$
25	$-5,72 + \frac{3050}{T}$
	$-5,32 + \frac{3129}{T}$
	$-4,84 + \frac{3075}{T}$
	$-3,49 + \frac{2617}{T}$
35	$-5,32 + \frac{3129}{T}$
	$-4,84 + \frac{3075}{T}$
40	$-4,84 + \frac{3075}{T}$
	$-3,49 + \frac{2617}{T}$
45	$-3,49 + \frac{2617}{T}$
	$-3,49 + \frac{2617}{T}$

рая часть кривой характеризует распределение пробивного напряжения изоляции без микротрещин, разброс которого объясняется различной толщиной и неоднородностью структуры изоляции.

Связь между продолжительностью термообработки изоляции микропровода τ и температурой при заданной электрической прочности может быть определена из зависимости

$$\tau = Ae^{\frac{B}{T}},$$

где T — температура $^{\circ}\text{K}$, A и B — постоянные коэффициенты (табл. 21). Что касается электросопротивления стеклоизоляции, то приведенные выше для него значения не ухудшаются после длительного пребывания микропровода в воде, а также кипения в течение 30 минут в концентрированной серной кислоте, 5% растворе соляной кислоты и 25% растворе едкого натра. Выдерживание микропровода в этих раст-

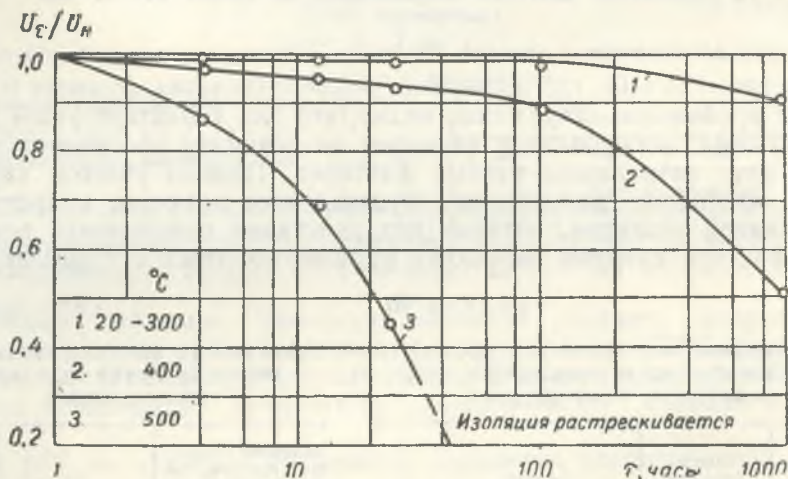


Рис. 126. Изменение электрической прочности стеклоизоляции медного микропровода после изотермической выдержки. Пунктиром обозначена зона растрескивания стеклоизоляции

ворах в течение 48 часов не приводит к снижению $\rho_{ст}$ [7]. Не изменяется $\rho_{ст}$ и после пребывания микропровода в течение 66 часов в этиловом спирте, 50% растворе едкого натра и различных кислотах [34].

Некоторые сведения об изменении прочности медного микропровода и МЛСН-60 под влиянием теплового воздействия изложены в [44].

Можно отметить, что длительность изотермической выдержки от 0,5 до 6 часов не сказывается на степени снижения прочности микропровода. Представление об электрической прочности медного микро-

провода и ее изменении после изотермической выдержки дает рис. 126. Аналогичное влияние оказывает изотермическая выдержка и на микропровод из сплава 60НГХ. Интересно отметить, что изотермическая выдержка в течение 1000 часов при температуре 200°C приводит к снижению прочности медного микропровода ($D=40$ мкм, $d=30$ мкм) в два раза, при температуре 300 и 400°C — в 7 раз, а при 500°C микропровод настолько теряет прочность, что его невозможно использовать для дальнейшего исследования. Как указывается в [23], в результате шестичасовой тепловой обработки при 300°C прочность манганинового микропровода снижается в среднем на 25%.

Исследование влияния влажности на прочностные свойства микропровода определялось при непосредственном воздействии воды, а также после воздействия повышенной влажности (95—98%) при температуре 40°C [44]. В результате испытаний отмечено, что кратковременная выдержка в воде образцов микропровода из меди диаметром от 10 до 70 мкм и сплава 60НГХ диаметром от 5 до 20 мкм не снижает их прочности. Также не наблюдалось уменьшения прочности микропроводов с жилой из меди, серебра, никрома и 60НГХ после воздействия в течение 500 часов атмосферы с относительной влажностью 95—98% при температуре 40°C.

§ 7. Токи плавления микропроводов

Под током плавления ($I_{пл}$) отрезка микропровода следует понимать минимальный ток плавления, который при установившемся режиме доведет температуру отрезка до температуры плавления. Для расчета $I_{пл}$ воспользуемся дифференциальным уравнением установившегося теплового состояния отрезка микропровода длиной $2l$, нагреваемого постоянным током и расположенного в неограниченном пространстве [46]

$$\frac{d^2\Theta}{dx^2} - \frac{\alpha_{ст} U_{ст}}{\lambda_{ж} F_{ж}} \Theta - \frac{\varepsilon_{мп} C_0 U_{ст}}{\lambda_{ж} F_{ж}} B\Theta + \frac{I^2}{\lambda_{ж} F_{ж}^2} \rho_{ж0} \beta_{ж0} \Theta + \frac{I^2}{\lambda_{ж} F_{ж}^2} = \rho_{ж0} = 0, \quad (6.7.1)$$

где $\Theta = T - T_0 = t - t_0$ — избыточная температура, °К, °С; T , t , T_0 , t_0 — температуры микропровода и окружающего воздуха, °К, °С; $\alpha_{ст}$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией bt/m^2 , °С; $u_{ст}$ — периметр микропровода по изоляции, м; $\lambda_{ж}$ и $\lambda_{ж0}$ — коэффициенты теплопроводности материала жилы плавкой вставки при температурах t и $t_0 = 0^\circ\text{C}$, Вт/м·град; $\rho_{ж}$ и $\rho_{ж0}$ — удельное сопротивление материала жилы при температурах t и $t_0 = 0^\circ\text{C}$, Ом·м; $\beta_{ж0}$ — температурный коэффициент сопротивления материала 1/град; $F_{ж}$ — площадь поперечного

сечения жилы микропровода, m^2 ; $\varepsilon_{мп}$ — степень черноты микропровода; C_0 — постоянная Стефана—Больцмана, $вт/м^2 \cdot град$. При составлении уравнения принято, что $t_0 = 0^\circ C$, потери тепла излучением пропорциональны разности первых степеней температуры, т.е. $T^4 - T_0^4 = B(T - T_0)$, где $B = T^3 + T^2 \cdot T_0 + T \cdot T_0^2 + T_0^3$, $\rho_{ж} = f(T)$, $\lambda_{ж} \neq \varphi(T)$, а потери тепла теплопроводностью через стеклянную изоляцию отсутствуют в силу того, что $\lambda_{ж} \gg \lambda_{ст}$. Приведем (6.7.1) к виду:

$$\frac{d^2\Theta}{dx^2} - \left(\frac{\alpha_{ст} u_{ст} F_{ж} + \varepsilon_{мп} c_0 u_{ст} B \cdot F_{ж} - I^2 \rho_{жо} \cdot \beta_{жо}}{\lambda_{ж} F_{ж}^2} \right) \Theta + \frac{I^2}{\lambda_{ж} F_{ж}^2} \rho_{жо} = 0. \quad (6.7.2)$$

Обозначим

$$N = \sqrt{\frac{\alpha_{ст} u_{ст} F_{ж} + \varepsilon_{мп} c_0 u_{ст} B F_{ж} - I^2 \rho_{жо} \beta_{жо}}{\lambda_{ж} F_{ж}^2}}, \quad (6.7.3)$$

$$S = \frac{I^2}{\lambda_{ж} F_{ж}^2} \rho_{жо}. \quad (6.7.4)$$

Выражение (6.7.2) принимает вид

$$\frac{d^2\Theta}{dx^2} - N^2\Theta + S = 0. \quad (6.7.5)$$

Полный интеграл этого дифференциального уравнения второго порядка, как известно, имеет вид

$$\Theta = A e^{m_1 x} + C e^{m_2 x} + \frac{S}{N^2}, \quad (6.7.6)$$

где m_1 и m_2 — корни характеристического уравнения. В рассматриваемом случае $m_1 = N$ и $m_2 = -N$. Следовательно,

$$\Theta = A e^{Nx} + C e^{-Nx} + \frac{S}{N^2}. \quad (6.7.7)$$

Рассмотрим область отрезка микропровода $0 < x < l$. Постоянные A и C , определяемые из (6.7.7) при условиях $x = 0$, $\Theta = 0$ и $x = l$, $\Theta = \Theta_{пл}$ принимают вид

$$A = -\frac{S}{N^2} \cdot \frac{e^{-Nl}}{e^{-Nl} + e^{Nl}}, \quad C = -\frac{S}{N^2} \cdot \frac{e^{Nl}}{e^{-Nl} + e^{Nl}}. \quad (6.7.8)$$

Для температуры в середине отрезка ($x=l$) можно записать

$$\Theta_{пл} = \frac{S}{N^2} \left[1 - \frac{1}{chNl} \right], \quad (6.7.9)$$

Расчет сводится к определению $I_{пл}$ в установившемся режиме. Этот ток приводит к нагреву отрезка при $x=l$ до $t_{пл}$. Подставляя значение N и S в (6.7.9) и решая его относительно $I_{пл}$, получим

$$I_{пл} = \sqrt{\frac{(t_{пл}-t_0)(\alpha_{ст} u_{ст} + \epsilon_{мп} C_0 u_{ст} B) F_{ж}}{\rho_{жо} + \rho_{жо} \beta_{жо} (t_{пл}-t_0) - \rho_{жо} / chNl}}}, \quad (6.7.10)$$

Принимая во внимание, что

$$\rho_{жо} + \rho_{жо} \beta_{жо} (t_{пл}-t_0) = \rho_{жпл}; \quad F_{ж} = \frac{\pi d^2}{4}; \quad u_{ст} = \pi D; \quad \alpha_{ст} D = Nu_{ст} \lambda_{в}, \quad (6.7.11)$$

выражение (6.7.10) принимает вид

$$I_{пл} = \frac{\pi d}{2} \sqrt{\frac{(t_{пл}-t_0)(Nu_{ст} \cdot \lambda_{в} + \epsilon_{мп} C_0 DB)}{\rho_{жпл} - \frac{\rho_{жо}}{chNl}}}, \quad (6.7.12)$$

где $Nu_{ст}$ — критерий Нуссельта по изоляции. Можно показать, что

$$\lambda_{в} = \lambda_{впл} \left(1 + \frac{\lambda_{во} \gamma_{во} t_0}{2\lambda_{впл}} \right),$$

где $\gamma_{во}$ — температурный коэффициент теплопроводности воздуха, 1/град. Тогда (6.7.12) запишется

$$I_{пл} = \frac{\pi d}{2} \sqrt{\frac{Nu_{ст} \cdot \lambda_{впл} \cdot t_{пл}}{\rho_{жпл}}} \times \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{t_0}{t_{пл}}\right) \left(1 + \frac{\lambda_{во} \gamma_{во} t_0}{2\lambda_{впл}}\right) \left(1 + \frac{\epsilon_{мп} c_0 DB}{Nu_{ст} \lambda_{в}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_{жо}}{\rho_{жпл} \cdot chNl}\right)}}}, \quad (6.7.13)$$

Из (6.7.13), используя правила приближенных вычислений, поправки, учитывающие влияние на $I_{пл}$ температуры окружающего воздуха ($\delta_{в}$), потери на лучеиспускание ($\delta_{л}$), охлаждающее действие концов ($\delta_{к}$) принимают вид

$$\delta_{в} = - \frac{t_0}{2 t_{пл}} + \frac{\lambda_{во} \gamma_{во} t_0}{4 \lambda_{впл}}, \quad (6.7.14)$$

$$\delta_{л} = \frac{\epsilon_{мп} C_0 DB}{2 Nu_{ст} \lambda_{впл}}, \quad (6.7.15)$$

$$\delta_k = \frac{1}{2} \frac{\rho_{ж о}}{\rho_{ж пл}} \frac{1}{ch Nl} \quad (6.7.16)$$

Из (6.7.3), исключая из числителя второе слагаемое, составляющее небольшую часть от первого и подставляя в него (6.7.9), без учета поправок, для N при условии, что $l = l_{пл}$ и $t = t_{пл}$, можно получить выражение

$$N = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{Nu_{ст} \rho_{ж о} \lambda_{в пл}}{\lambda_{ж пл} \rho_{ж пл}}} \quad (6.7.17)$$

Подставляя (6.7.17) в (6.7.16), получим окончательно для δ_k при аргументе более 1:

$$\delta_k \approx \frac{\rho_{ж о}}{\rho_{ж пл}} e^{-\frac{2l}{d} \sqrt{\frac{Nu_{ст} \rho_{ж о} \lambda_{в пл}}{\lambda_{ж пл} \rho_{ж пл}}}} \quad (6.7.18)$$

Из [47, 48] известно, что для

$$[Gr \cdot Pr]_m = 10^{-3} \div 10^{-5}, \quad Nu_m = 0,92 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{12}},$$

$$[Gr \cdot Pr]_m = 10^{-5} \div 10^{-9}, \quad Nu_m = 0,75 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{16}},$$

где Gr и Pr — критерии Грасгофа и Прандтля. Для $Gr \cdot Pr$ можно записать $Gr \cdot Pr = kD^3$, где $k = g \frac{\beta_v \Theta}{\nu_v^3}$ зависит только от Θ . Здесь g —

ускорение силы тяжести, $m^2/сек$; β_v — коэффициент объемного расширения воздуха, $1/град$; ν_v — коэффициент кинематической вязкости воздуха, $m^2/сек$. При $\Theta > 600^\circ C$ коэффициент k для интервала температур от -100 до $+100^\circ C$ изменяется в пределах от 0,8 до 20. В этом случае для $[Gr \cdot Pr]_m = 10^{-3} - 10^{-9}$ можно принять, что $k^{1/24}$ и $k^{1/32} \approx 1$. Тогда при

$$[Gr \cdot Pr]_m = 10^{-3} - 10^{-5}, \quad Nu_{ст} = 0,92 D^{\frac{3}{12}},$$

$$[Gr \cdot Pr]_m = 10^{-5} - 10^{-9}, \quad Nu_{ст} = 0,75 D^{\frac{3}{16}}.$$

Таким образом, $l_{пл}$ без учета поправок для $[Gr \cdot Pr]_m = 10^{-3} - 10^{-5}$:

$$l_{пл}^* = 1,5 d D^{0,125} \sqrt{\frac{\lambda_{в пл} t_{пл}}{\rho_{ж пл}}}, \quad (6.7.19)$$

$$[Gr \cdot Pr]_m = 10^{-5} - 10^{-9},$$

$$I_{\text{пл}}^* = 1,4 d D^{0,1} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{в пл}} t_{\text{пл}}}{\rho_{\text{ж пл}}}} \quad (6.7.20)$$

Уравнение (6.7.1) составлено без учета радиального распределения температур в стеклянной изоляции; температура на поверхности стекла $t_{\text{ст}}$ принята равной $t_{\text{ж}}$. Поэтому расчет тепла, отдаваемого элементом dx отрезка микропровода конвекцией, по диаметру D дает несколько завышенные значения для $I_{\text{пл}}$. Действительно, используя уравнение для установившегося перепада температур в длинной трубе [49], получим систему двух уравнений:

$$Q_3 = \pi \lambda_{\text{в пл}} \text{Nu}_{\text{ст пл}} (t_{\text{пл}} - t_0) dx = \frac{4 I_{\text{пл}}^2 \rho_{\text{ж пл}}}{\pi d^2} dx,$$

$$Q_3^* = 2 \pi \lambda_{\text{ст}} (t_{\text{пл}} - t_{\text{ст}}) dx,$$

$$Q_3^* = \pi \lambda_{\text{в}}^* \text{Nu}_{\text{ст}}^* (t_{\text{ст}} - t_0) dx = \frac{4 I_{\text{пл}}^2 \rho_{\text{ж пл}}}{\pi d^2} dx.$$

Здесь Q_3 — тепло, отдаваемое плавкой вставкой диаметром D при $t = t_{\text{пл}}$; Q_3^* — тепло, отдаваемое плавкой вставкой через стеклянный капилляр теплопроводностью $\lambda_{\text{ст}}$. В обоих случаях температура жилы отрезка равна $t_{\text{пл}}$. Сопоставляя все три уравнения, получим относительную разность токов $I_{\text{пл}}$ и $I_{\text{пл}}^*$:

$$\begin{aligned} \delta_c &= \frac{I_{\text{пл}}^* - I_{\text{пл}}}{I_{\text{пл}}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\frac{\lambda_{\text{в пл}} \text{Nu}_{\text{ст}}}{2 \lambda_{\text{ст}}} \ln \frac{D}{d} + \frac{\lambda_{\text{в пл}} \text{Nu}_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{в}}^* \text{Nu}_{\text{ст}}^*}}} - 1. \end{aligned} \quad (6.7.21)$$

В (6.7.21) $\lambda_{\text{в пл}}$ и $\text{Nu}_{\text{ст}}$ относятся к $t = 1/2 t_{\text{пл}}$, а $\lambda_{\text{в}}^*$ и $\text{Nu}_{\text{ст}}^*$ к $t = 1/2 t_{\text{ст}}$.

А. В. Лыков [50] указывает, что при критерии Био $\text{Bi} \ll 0,1$ радиальное изменение температуры в телах становится несущественным, это нашло экспериментальное подтверждение в работах Л. С. Эйгенсона [51]. Для рассматриваемых геометрических параметров микропроводов $\text{Bi} \ll 0,1$ это позволяет считать разность между $t_{\text{ст}}$ и $t_{\text{пл}}$ небольшой и в связи с этим пренебрежимо малым различие между указанными выше величинами. Тогда, используя правила приближенных вычислений, можно найти поправку к $I_{\text{пл}}$, обусловленную наличием стеклянной изоляции:

$$\delta_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\lambda_{\text{в пл}} \text{Nu}_{\text{ст}}}{2 \lambda_{\text{ст}}} \ln \frac{D}{d}}} - 1 = - \frac{\lambda_{\text{в пл}} \text{Nu}_{\text{ст}}}{2 \lambda_{\text{ст}}} \ln \frac{D}{d}. \quad (6.7.22)$$

Таким образом, для $I_{пл}$ с учетом полученных поправок можно записать

$$I_{пл} = I_{пл}^* (1 + \delta_v + \delta_l + \delta_k + \delta_c), \quad (6.7.23)$$

где

$$\delta_v = - \left(\frac{1}{2t_{пл}} + \frac{\lambda_{во} \gamma_{во}}{4\lambda_{в пл}} \right) t_0 \quad (\delta_v = 0 \text{ для } t_0 = 0),$$

$$\delta_l = \frac{\varepsilon_{мп} C_0 DB}{2 Nu_{ст} \lambda_v} \quad (\delta_l = 0 \text{ для } D \rightarrow 0),$$

$$\delta_k = \frac{\rho_{ж о}}{\rho_{ж пл}} \exp \left(- \frac{2l}{d} \sqrt{\frac{\lambda_{в пл} \rho_{ж о} Nu_{ст}}{\lambda_{ж пл} \rho_{ж пл}}} \right) \quad (\delta_k = 0 \text{ для } l \gg d),$$

$$\delta_c = - \frac{\lambda_{в пл} Nu_{ст}}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{D}{d} \quad (\delta_c = 0 \text{ для } D = d).$$

Полученные выражения предназначены для расчета $I_{пл}$ отрезков, у которых $2l \gg d$. В случаях, когда $2l$ становится соизмеримо с d , можно принять, что потери тепла конвекцией и излучением незначительны и

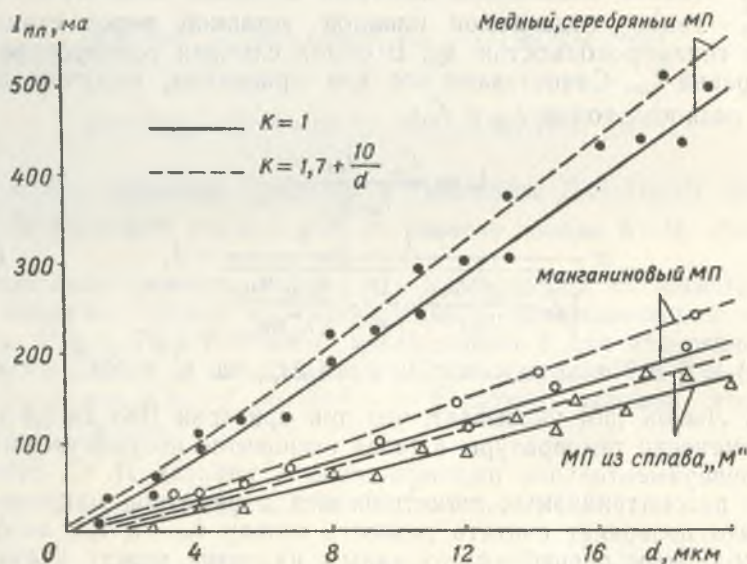


Рис. 127. Зависимость тока плавления от диаметра жилы микропровода

ими можно пренебречь. Если положить, что $\lambda_{ж}$ и $\rho_{ж}$ не зависят от температуры, то (6.7.1) принимает вид

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} + \frac{l^2 \rho_{ж}}{\lambda_{ж} F_{ж}^2} = 0. \quad (6.7.24)$$

Формулы для расчета токов плавления микропроводов

Зависимость	Материалы жилы	$T_0, ^\circ K$	$\frac{2l}{d}$	k
$I_{пл} = 0,3d^2 + 23d$	медь			
$I_{пл} = 0,2d^2 + 10,5d$	серебро	293	∞	$1,7 + \frac{10}{d}$
$I_{пл} = 0,15d^2 + 6,5d$	манганин	293	—	—
$I_{пл} k = I_{пл} k = 1 (1 + 0,01\sqrt{d})k^{1/9}$	сплав „М“	293	—	$1,7 + \frac{10}{d}$
$I_{пл} T_0 = I_{пл} T_0 = 293 \left[1,08 - 0,07 \frac{T_0}{293} - 0,02 \left(\frac{T_0}{293} \right)^2 \right]$	любой	293	—	≥ 1
$I_{пл} 2l = I_{пл} 2l = \infty \left(\frac{150}{\frac{2l}{d} + 0,5} \right)$	медь			
$I_{пл} 2l = I_{пл} 2l = \infty \left(\frac{65}{\frac{2l}{d} + 0,45} \right)$	серебро	293	≤ 250	—
$I_{пл} 2l = I_{пл} 2l = \infty \left(\frac{45}{\frac{2l}{d} + 0,2} \right)$	манганин	—	≤ 100	—
	сплав „М“	—	≤ 50	—

Решение (6.7.24) для записанных выше граничных условий при $\theta = \theta_{пл}$ позволяет получить

$$I_{пл} = \frac{\pi\sqrt{2}}{4} \cdot \frac{d^2}{l} \sqrt{\frac{\theta_{пл} \lambda_{ж пл}}{\rho_{ж пл}}} \quad (6.7.25)$$

Известно, что согласно соотношению Видемана-Франца при комнатной температуре [52] $\lambda \cdot \rho \approx \text{const}$. Лоренц, исследуя это соотношение при различных температурах, нашел [53]: $\frac{\lambda \cdot \rho}{T} \approx L_0 \approx \text{const}$, где L_0 — постоянная Лоренца. В [52] отмечается, что соотношения Видемана-Франца и Лоренца верны для сравнительно высоких температур, что имеет место в наших случаях. Тогда (6.7.25) с учетом изложенного принимает вид

$$I_{пл} = \frac{\pi\sqrt{2}}{4} \cdot \frac{d^2}{l \rho_{ж пл}} \sqrt{\theta_{пл} L_0 T_{пл}} \quad (6.7.26)$$

Результаты экспериментального определения $I_{пл}$ для некоторых микропроводов с $d \leq 20$ мкм при $\frac{D}{d} = 1,7 + \frac{10}{d}$ и $\frac{D}{d} = 1$ представлены на

рис. 127. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 12%.

Для расчета $I_{пл} = f\left(d, k, \frac{2l}{d}, T_0\right)$ по экспериментальным данным получен ряд аппроксимирующих зависимостей (табл. 22), погрешность расчета по которым не превышает 15%.
В этих зависимостях $I_{пл}$ — в ма, d в мкм.

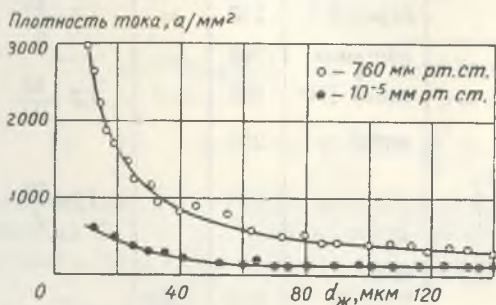


Рис. 128. Плотность тока плавления медного микропровода в вакууме

Результаты исследования плотностей тока плавления медных микропроводов в вакууме приведены в [44]. Они представлены и на рис. 128.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Я. Бадингер. Активное сопротивление плавких вставок из литого микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 280—285.
2. В. П. Матвеев. Некоторые закономерности формирования параметров микропроводов в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 19—24.
3. М. П. Славинский. Физико-химические свойства элементов. М., Металлургиздат, 1952.
4. А. С. Быков. Исследование структурно-чувствительных свойств микростеклопроводов как материалов точного электроприборостроения. Автореферат диссертации. М., Металлургиздат, 1967.
5. А. А. Буренина, Н. Я. Карасик, И. М. Касаткина, В. П. Матвеев. Металлографическое исследование капель и микропроводов из меди. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 65—73.
6. R. G. S. Clarke. Méthode révolutionnaire de production de fils électriques ultra-fins. *Électronique professionnelle*, 31, № 320, 1962.
7. Е. Я. Бадингер, З. И. Зеликовский. Исследование свойств литых микропроводов из сплавов сопротивления со стеклянной изоляцией. Кабельная техника, 1965, № 35, 31—35.
8. Э. А. Альфган. Литые микропровода в стеклянной изоляции из сплавов сопротивления. Вопросы радиоэлектроники. Серия III. Детали и компоненты аппаратуры, вып. 10, 1964, 11—17.
9. Микропровода высокоомные литые в стеклянной изоляции. МЛС72Н, технические условия ЮБ0.664.012.TV.

10. С. В. Деянова, Э. А. Альфтан. Новые литые микропровода с высоким удельным электросопротивлением. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 117—121.
11. Э. А. Альфтан, С. В. Деянова. Микропровода МЛСК-37, МЛСК-80 и МЛСК-60. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 78—91.
12. Э. А. Альфтан, В. С. Мескин. Новые литые микропровода из сплавов сопротивления. Микропровод и приборы сопротивления, вып. III. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965, 89—100.
13. Е. Я. Бадинтер. Литые микропровода из сплавов сопротивления. Микропровод и приборы сопротивления, вып. III. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965, 3—16.
14. Е. Я. Бадинтер, С. И. Балабан. Удельное сопротивление манганинового микропровода в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. I. Кишинев, «Штинца», 1962, 44—50.
15. В. Б. Борок, И. А. Кучеренко, Н. Ю. Юсипов. Влияние процесса получения микропроводов на удельное электросопротивление германия. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 97—102.
16. Манганиновый микропровод в стеклянной изоляции. Заводская нормаль ОМ4.645.ООН.
17. Микропровода высокоомные литые в стеклянной изоляции МЛСН-60. Технические условия, ЮБ0.664.002.ТУ.
18. А. А. Smith. New techniques for producing copper microwire. „The Wire Industry“, 29, № 342, 1962.
19. Е. Я. Бадинтер, И. Г. Лазурьевская, Л. С. Михайлова. Температурный коэффициент сопротивления литого манганинового микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. II. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1964, 60—66.
20. Е. Я. Бадинтер, С. И. Балабан, З. И. Зеликовский. Температурные характеристики упруго деформированного микропровода в изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 124—130.
21. Е. Я. Бадинтер, З. И. Зеликовский, Ж. В. Кейсер. О стабильности резисторов из манганинового микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 206—216.
22. З. И. Зеликовский, М. И. Шлеймович. О действии высоких температур на контактные узлы резисторов из остеклованного микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. III. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965, 246—251.
23. Е. Я. Бадинтер, И. Г. Лазурьевская. Влияние режима термообработки на температурный коэффициент сопротивления литого манганинового микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. I. Кишинев, «Штинца», 1962, 76—84.
24. В. С. Рыбаков, М. П. Ромачевский. Применение микропровода в малогабаритных электрических машинах. Микропровод и приборы сопротивления, вып. I. Кишинев, «Штинца», 1962, 244—250.
25. В. С. Копань. Отжиг остеклованных микропроводов. Изучение дефектов кристаллического строения металлов и сплавов. Киев. Изд-во АН УССР, 1966.
26. В. С. Мескин, Э. А. Альфтан, С. В. Деянова. Микропровода из сплавов типа константан. Вопросы радиоэлектроники. Серия III. Детали и компоненты аппаратуры, вып. 10, 1964, 3—11.
27. Е. Я. Бадинтер, С. И. Балабан, Е. М. Лыско. Электрическая прочность стеклянной изоляции литого манганинового микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. I. Кишинев, «Штинца», 1962, 101—110.
28. И. Ф. Драбенко, З. И. Зеликовский, З. В. Литвак. К расчету напряженности электрического поля в обмотках из микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VI. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1969, 228—233.
29. П. М. Сиваков. Исследование свойств стеклянной изоляции микропроводов при различных температурах. Вопросы радиоэлектроники. Серия III. Детали и компоненты аппаратуры, вып. 10, 1964, 40—55.

30. З. И. Зеликовский, В. П. Цетенс, Б. С. Цукерблат. Действие электрического напряжения на микропровод и сопротивления из микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. II. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1964, 224—238.
31. С. И. Балабан, Е. М. Лыско. Влияние внешней среды на электрическую прочность стеклянной изоляции литого марганцевого микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. II. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1964, 55—60.
32. Л. А. Дидковская, И. Ф. Драбенко. Зависимость времени до пробоя стеклоизоляции микропровода от величины приложенного напряжения и температуры. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 167—172.
33. Микропровода медные литые в стеклянной изоляции ММЛС. ЮБ0.664.000.TU, редакция Л-66.
34. Кавамата Коваси, Сэкигута Такэси. Микропровода со стеклянной изоляцией. «Когэ дзайре», Engng. Mater., 1966, 14, № 7 (Японск.), РЖ Энергетика и электротехника, 1967, № 4Б 11711.
35. И. Ф. Драбенко, Е. А. Серний. Электрическое сопротивление стеклоизоляции марганцевого микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VI. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1969, 128—133.
36. В. П. Максин. Формовка стекла и ее влияние на электропроводность изоляции микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 91—98.
37. С. Н. Димитраки, З. И. Зеликовский. Влияние нагрева при намотке по заданному сопротивлению резисторов из остеклованного микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 263—270.
38. В. П. Максин. Влияние отжига изоляции микропровода на ее электропроводность. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 130—132.
39. Technical Communication, N 388. An Electrical Conductor of Unusual Properties. G. D-microwire Applied Usearch Instruments LTD.
40. Д. А. Чунин, Т. М. Бобылева, М. Ф. Шмырева, П. М. Сиваков. Исследование стабильности и теплостойкости микропроводов. Электронная техника. Серия 9. Радиокомпоненты, вып. I, 66—77.
41. Е. Я. Бадинтер, Н. Я. Карасик, Ж. В. Кейсер, Н. Е. Фаддеева. К вопросу о структуре переходного слоя и изменении электрического сопротивления литых микропроводов во времени. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VI. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1969, 86—95.
42. А. А. Меркулов, Т. М. Красикова. Исследование влияния охлаждения до -70°C на микропроводочные сопротивления. Достижения в области разработки, производства и применения микропровода в стеклянной изоляции. М., ЦИНТИ Электропром, 1962.
43. Н. Д. Спивак, В. П. Цетенс. О холодостойкости прецизионных резисторов из микропровода в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 136—138.
44. Б. В. Фармаковский. Исследование некоторых физико-механических свойств литых микропроводов в условиях повышенных температур, повышенной влажности и вакуума. Вопросы радиоэлектроники, серия III. Детали и компоненты аппаратуры, вып. 10, 1964, 124—138.
45. Н. Р. Берман, П. А. Высокий, М. В. Гивельберг. Неравномерность электрических свойств микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IX. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1972, 3—20.
46. Е. Я. Бадинтер, З. И. Зеликовский, И. Г. Лазурьевская. Экспериментальное и теоретическое исследование токов плавления литых микропроводов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. III. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1965, 107—116.

47. З. И. Зеликовский, Е. А. Серний. Теплоотдача тонкого горизонтального цилиндра в условиях свободной конвекции. Микروпровод и приборы сопротивления, вып. II. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1963, 89—96.
48. Е. Я. Бадинтер, С. И. Балабан, З. И. Зеликовский. Установка для исследования электрофизических свойств микрпровода. Микрпровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 103—113.
49. М. А. Михеев. Основы теплопередачи. М., Госэнергоиздат, 1956.
50. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. М., ГИТТЛ, 1965.
51. Л. С. Эйгенсон [и др.]. Термические основы формирования стекла. М., Госстройиздат, 1959.
52. Б. Г. Лифшиц. Физические свойства металлов и сплавов. М., Машгиз, 1959.
53. В. Н. Чиркин. Теплофизические свойства материалов. М., Физматгиз, 1959.
54. А. М. Фирсов, Э. А. Альфтан, Л. Г. Миронова, Л. И. Докукин. Свойства микрпроводов с ферромагнитной жилой. Электронная техника, серия Радиокомпоненты, вып. 1, 1967, 95—102.

ГЛАВА VII

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МИКРОПРОВОДА

Правильная оценка свойств микропровода является одним из условий его рационального использования.

Специфические особенности микропровода (микронные размеры, наличие стеклянной изоляции) не всегда позволяют использовать методы, предусмотренные стандартами. В связи с этим чаще всего возникала необходимость в разработке специальных методов и устройств. Особое внимание уделялось созданию способов крепления образцов при испытании, повышению чувствительности устройств, разработке неразрушающих способов измерения его параметров.

Во многих случаях аппаратура для исследования некоторых свойств микропровода разрабатывалась на основе описанных в литературе методик и устройств для аналогичных целей применительно к стеклянным волокнам и металлическим нитям типа усов. Способы химического, спектрального, металлографического и рентгеноструктурного анализов литых микропроводов создавались на базе классических методов.

В настоящее время методы и аппаратура для исследования свойств микропровода продолжают улучшаться: повышается точность, уменьшается длина испытываемых отрезков до нескольких миллиметров, создаются новые способы и устройства для исследования специфических свойств микропровода (степени черноты, коэффициента теплопроводности, температуры плавления и др.).

§ 1. Определение геометрических размеров микропровода

Измерение диаметра жилы микропровода обычно производится на микроскопах МИМ-7, МИМ-8, МИН-8 и др. с помощью иммерсионной жидкости [1]. Измеряемый отрезок микропровода помещается на покровное

стекло, на которое наносится капля иммерсионной жидкости с показателем преломления, близким показателю преломления стеклянной изоляции. В этом случае стекло вместе с жидкостью проявляет себя как оптически почти однородное тело и в окуляре микроскопа наблюдается изображение жилы микропровода.

При измерениях обычно используют смесь иммерсионных жидкостей с малыми номерами из стандартного набора микроскопа. В качестве окуляра применяют винтовой микрометр МОВ-1—15×, цена деления которого в этом случае определяется увеличением установленного объектива. Например, при объективе 71,7× цена деления 0,14 мкм. Относительная погрешность измерения увеличивается с уменьшением диаметра и достигает при $d < 3$ мкм более 10%. Рост погрешности вызван дифракцией. Для определения соответствующих поправок к показаниям оптического микроскопа при измерении диаметра стекловолокна были проведены

сравнительные измерения с помощью электронного микроскопа (рис. 129 [2]). Эти исследования показали, что при измерениях диаметров меньших 5 мкм оптический метод дает заниженные значения.

Измерение внешнего диаметра микропровода проводят оптическим методом, но без иммерсионной жидкости, пассаметром или фотоэлектрическим микрометром. Погрешность измерения фотоэлектрическим микрометром в статике не превышает 0,5 мкм [3].

Для определения диаметров на электронном микроскопе необходимо изготовить шлифы, методика приготовления которых описывается в конце главы. Сложность и трудоемкость этого способа, несмотря на высокую точность, ограничили его применение.

Описанные способы относятся к измерениям диаметров микропровода в определенной точке. Для определения его геометрии на отрезке находят случайную функцию изменения поперечных размеров микропровода. Экспериментально определенная в [4] автокорреляционная функция изменения диаметров микропровода по длине аппроксимируется выражением

$$\rho(l) = \frac{\sin bl}{bl}$$

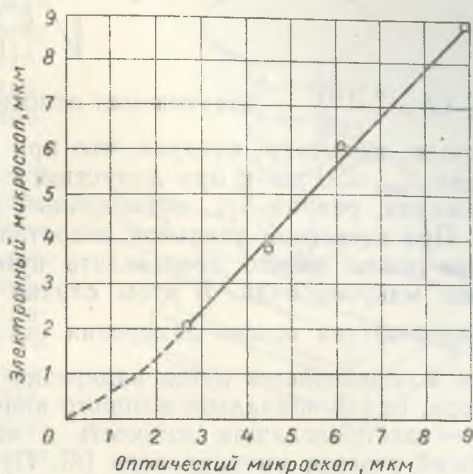


Рис. 129. Сравнение значений диаметра стеклянного волокна при измерениях с помощью оптического и электронного микроскопов

где $\rho(l)$ — нормированная функция корреляции, bl — выраженный в радианах интервал корреляции. В этом случае оптимальный шаг квантования l_0 определяется по формуле [5]

$$l_0 = \frac{\sqrt{8\delta d}}{\sqrt{\left| \frac{\rho''(l)}{\rho(l)} \right|_{\max}}}$$

где $\delta d \geq \frac{\Delta[\rho(l)]}{\rho(l)}$ — допускаемая относительная погрешность измерения.

Отсюда, например, следует, что при максимальном интервале корреляции $l_{\max} = 30$ мм и при допустимой относительной погрешности приближения, равной 5%, оптимальный шаг квантования 1 мм.

При известном удельном сопротивлении определение среднего диаметра жилы можно производить путем измерения сопротивления отрезка микропровода. В этом случае внешний диаметр микропровода определяют на основе измерения отношения диаметров $k = \frac{D}{d}$. Величина k определяется путем измерения емкости цилиндрического конденсатора, одной обкладкой которого является жила микропровода, а другой — токопроводящая жидкость в ванночке, куда помещается измеряемый отрезок микропровода [6]. При этом k находят по формуле

$$k = \exp \frac{0,241 \varepsilon l}{C},$$

где ε — диэлектрическая проницаемость стеклянной изоляции, l — длина измеряемого отрезка микропровода, C — емкость. Погрешность измерения k по длине [6] не превышает 1—2%. Измерение среднего значения k по длине отрезка микропровода может производиться также и другими методами, например, по значению постоянной времени. Несмотря на очевидную простоту и промышленную полезность, методы измерения средних значений поперечных размеров микропровода еще не получили достаточно широкого распространения. Однако есть основания предполагать, что это дело недалекого будущего.

§ 2. Измерение механической прочности микропровода

Определение разрывного усилия микропровода производится на различных установках, конструктивно отличающихся схемами нагружения. При этом разделяют метод ступенчатого и метод непрерывного нагружения. Все методики в основном предусматривают предварительный монтаж микропровода в бумажной рамке. Специальным приспособлением рамка вырубается с внутренним отверстием, размеры которого определяются длиной испытуемого отрезка микропровода (рис. 130) [7]. Микропровод приклеивается внутри бумажной рамки параллель-

но ее краям. Рамка с микропроводом закрепляется зажимами на разрывной установке. Перед началом нагружения разрезаются края рамки. При одном из способов нагружения к нижнему краю рамки подвешивается чашечка из фольги, в которую насыпается песок или металлический порошок, что позволяет добиться достаточно медленного возрастания нагрузки. О прочности микропровода судят по весу чашечки с песком в момент разрушения. Взвешивание производят с точностью до 10^{-4} н.

Для определения разрывного усилия можно воспользоваться установками, смонтированными на базе аналитических весов АДВ-200, в которых нагружающий и силоизмерительный механизм состоит из соленоида постоянного тока с железным сердечником, подвешенного к одному плечу коромысла весов (рис. 131). Эта установка аналогична установке, применяемой для исследования разрывного усилия нитевидных кристаллов [8]. Имеется еще целый ряд установок, устройство которых принципиально не отличается от

применяемых в исследованиях механических свойств монокристаллов микронных размеров, достаточно полно описанных в соответствующей литературе. В частности, для снятия диаграмм растяжения используют микромашину «Минитрон-44» с электронной системой регулирования [9, 10]. Микромашина позволяет испытывать на разрыв образцы длиной от 2 до 130 мм при скоростях нагружения от 0,4 до 55 мм/мин.

Для определения деформации микропровода при изгибе применяют установку (рис. 132), описанную А. И. Одингом и И. М. Копьевым в [11]. При испытании микропровод приклеивается к тонкой игле шеллаком или дифинил-карбазидом. Игла установлена под бинокулярным микроскопом на вращающемся лимбе. При вращении лимба микропровод изгибается концом лезвия бритвы. Радиус кривизны определяют непосредственно с помощью окуляр-микрометра или путем фотографирования изогнутого микропровода с последующим измерением на фотографии его радиуса кривизны.

Более точные результаты получаются при использовании модернизированного варианта этой установки, разработанного в КНИИЭП. На предметном столике микроскопа МИН-8 с помощью препаратодителя укрепляется игла, расположенная строго вертикально и пере-

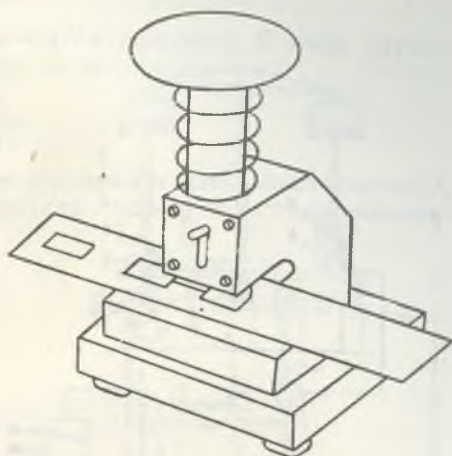


Рис. 130. Приспособление для изготовления рамок, используемых при исследовании механической прочности микропровода

двигающаяся в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Игла может также вращаться в горизонтальной плоскости. На неподвижной части предметного столика укреплен второй препаратоводитель, где в вертикальном положении установлено лезвие, обладающее способно-

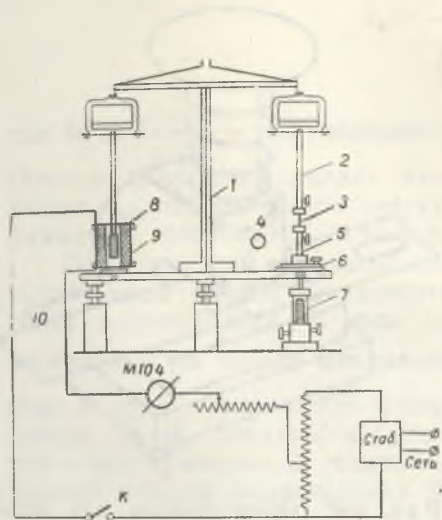


Рис. 131. Схема установки для исследования разрывного усилия тонких нитей (микропроводов или нитевидных кристаллов) на базе аналитических весов АДВ-200:

1 — аналитические весы АДВ-200; 2 — стержень верхнего захвата; 3 — исследуемый микропровод; 4 — осветитель; 5 — нижний захват; 6 — препаратоводитель СТ-12; 7 — механизм вертикального подъема; 8 — железный сердечник; 9 — соленоид; 10 — электрическая часть

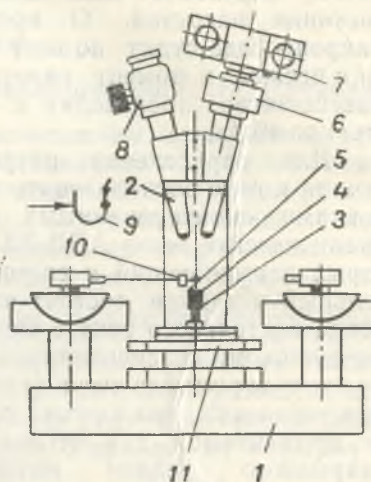


Рис. 132. Схема установки Одинг и Копьева для испытания тонких нитей на изгиб:

1 — микроманипулятор ММ-1; 2 — бинокулярный микроскоп; 3 — стержень; 4 — втулка нарезная; 5 — стальная игла; 6 — фотоаппарат; 7 — фотоаппарат; 8 — окуляр-микрометр; 9 — микропровод; 10 — лезвие бритвы; 11 — корпус лимба

стью перемещаться в двух взаимноперпендикулярных направлениях по горизонтали. Исследуемый образец микропровода длиной 3—4 мм приклеивается цапон-лаком к игле перпендикулярно оси. Затем игла устанавливается таким образом, чтобы точка закрепления микропровода находилась на оптической оси микроскопа и являлась центром вращения предметного столика. К образцу подводится лезвие, соприкасающееся с ним на некотором расстоянии от точки закрепления. Измерение длины участка микропровода, подвергающегося изгибу, производится при помощи окуляр-микрометра при увеличении $52,5\times$. Затем игла приводится в медленное вращение со скоростью 1 об/мин, микропровод, упираясь в лезвие, изгибается до разрушения. Угол поворота отсчитывается по угломеру предметного столика.

Схематически испытание микропровода на изгиб представлено рис. 133, откуда видно, что радиус изгиба вычисляется по формуле

$$r = \frac{l}{2 \sin \varphi},$$

где l — длина испытываемого участка, φ — угол поворота. В этом случае деформация микропровода определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{D}{2r}.$$

Максимальная погрешность метода не превышает 10%. Эксперименты, проведенные и описанные в [12], показали хорошую сходимость отдельных измерений.

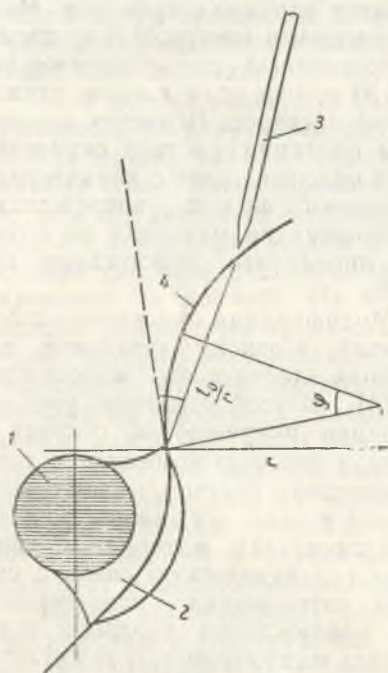


Рис. 133. Схема изгиба микропровода:
1 — шгла; 2 — слой цапон-лака; 3 — лезвие; 4 — отрезок микропровода

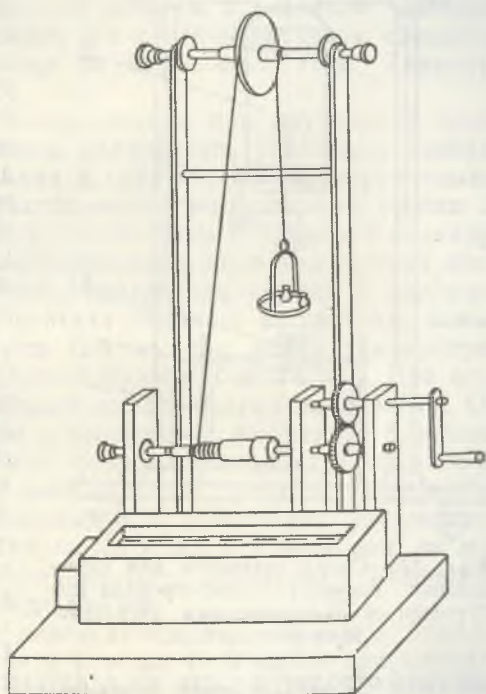


Рис. 134. Схема установки для определения критического радиуса изгиба микропровода

Определение критического радиуса изгиба микропровода при заданном натяжении производят по методике, предложенной М. А. Потаповым [13]. Микропровод наматывается на круглую ступенчатую справку из оргстекла (рис. 134). Воском, пластилином или канифолью

Один конец микропровода закрепляется на большем диаметре оправки. Второй конец перебрасывается через блок и к нему прикрепляется канифолью специальная площадка весом 0,005—0,01 н. Для натяжения микропровода на площадку ставится груз. Натяжение микропровода при изгибе определяется суммарным весом площадки с грузом. На каждую ступень оправки наматывается не менее пяти витков с постепенным переходом к меньшему диаметру ступени. Конец микропровода после намотки также укрепляется на конце оправки. В ванночку из оргстекла помещается оправка и электрод из красной меди, концы микропровода при этом выводятся наружу и подпаиваются к токоподводу. Ванна наполняется водой, содержащей 5—10 капель спиртового раствора фенолфталеина до полного покрытия оправки с проводом. Между проводом и электродом пропускают постоянный ток напряжением 60—100 в, при этом анодом служит медный электрод. В местах повреждения изоляции раствор окрашивается в красный цвет с характерным излучением из мест повреждения. Но изложенная методика не позволяет определить деформацию при изгибе.

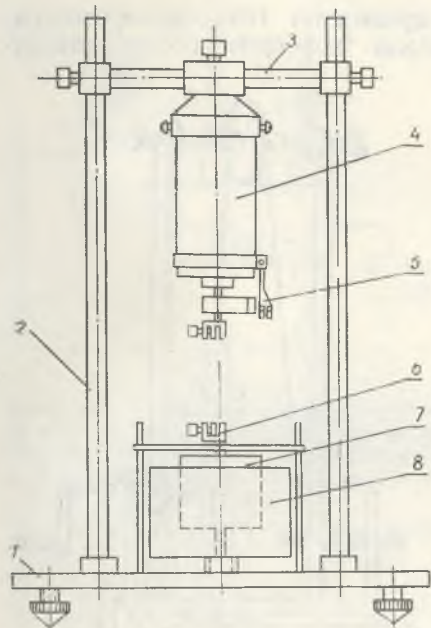


Рис. 135. Схема установки для исследования прочности микропровода при кручении с одновременным регулируемым натяжением

систему отводится часть тока, идущего через микропровод, и зажигается сигнальная лампочка.

Намотка микропровода на оправки диаметром от 1 до 5 мм (через 0,5 мм) производится с помощью электродвигателя со скоростью 2 об/мин. Установка отличается простотой обращения и высокой производительностью, что обеспечивает ее промышленное применение.

Для исследования сопротивления микропровода кручению может использоваться установка, разработанная для определения этого параметра у стекловолокна [2]. Установка состоит из стоек, на которых

Модификация описанного способа легла в основу установки для контроля эластичности микропровода [14]. В этой установке узел регистрации повреждений состоит из ванны, в которую помещается токопроводящий раствор, испытуемый образец и реле. Дно ванны покрыто токопроводящим материалом, имеющим гальваническую связь с системой сигнализации повреждений. При повреждении изоляции в эту

укреплен электродвигатель с малой скоростью вращения. На оси электродвигателя крепится держатель. Второй держатель может свободно перемещаться в вертикальном пазе стойки. На оси электродвигателя также укреплен стрелка, указывающая на отсчетном диске угол закручивания. Отрезок микропровода заданной длины перед испытанием крепится к бумажной рамке, как было описано в начале параграфа. Концы рамки вставляются в зажимы, после чего разрезаются ее края. Затем включают электродвигатель и определяют время кручения микропровода до обрыва. По числу оборотов электродвигателя рассчитывают предельный угол закручивания микропровода до его разрушения.

Другой вариант установки для исследования микропровода на кручение описан в [15]. Отрезок микропровода от 10 до 100 мм с помощью пайки жестко закрепляется в соосных центрах, один из которых имеет возможность осевого перемещения для выбора провисания провода. Второй центр вращается вокруг своей оси с отсчетом числа оборотов. Проведение испытаний микропровода на кручение в этом варианте может быть автоматизировано [14].

Для исследования прочности микропровода при кручении с одновременным регулируемым натяжением применяется установка, изображенная на рис. 135 [16]. На основании 1, снабженном регулировочными винтами для горизонтирования, расположены вертикальные стойки 2. По ним продвигается и фиксируется на необходимой высоте перекладина 3 с электродвигателем 4. Электродвигатель постоянного тока типа МН-250 снабжен счетчиком оборотов, контактная группа 5 которого укреплена на корпусе. На ось двигателя насажен эксцентрик, замыкающий контактную группу, а также зажимы для рамки с микропроводом, которые обеспечивают соосность образца и двигателя. Для осуществления регулировки натяга нижний зажим сделан подвижным. Он помещен на поплавке 7, плавающем в прозрачном резервуаре 8, наполненном водой. Поплавок, насаженный фторопластовой втулкой на ось, движется строго вертикально и с минимальным трением. Поперечная планка, скользящая по направляющим, при испытаниях удерживает поплавок и зажим вращения. Резервуар изготовлен подвижным, он может подниматься и опускаться, ввинчиваясь в основание. Установка позволяет испытывать образцы от 5 до 130 мм.

Перед испытаниями образцы клеиваются в П-образные бумажные рамочки и подвергаются сушке в течение 4—6 часов при комнатной температуре. Затем рамочка с образцом укрепляется в зажимах и разрезается, а резервуар медленно опускается до тех пор, пока образец не натягивается. При дальнейшем опускании резервуара часть поплавка, погруженная в жидкость, уменьшается и натяжение микропровода возрастает до заданной величины.

Для испытания микропровода на длительную прочность применяется установка, изображенная на рис. 136. Жесткая рама укреплена на основании, снабженном регулировочными винтами для горизонтирования. На раме находятся 20 зажимов для образцов. В нижней

части рамы на пружинах подвешена наклонная планка, под которой расположен нормально разомкнутый контакт, включенный в цепь источника постоянного тока и регистрирующего самопишущего прибора. Для нагружения образцов служит набор шайб разного веса. Испыта-

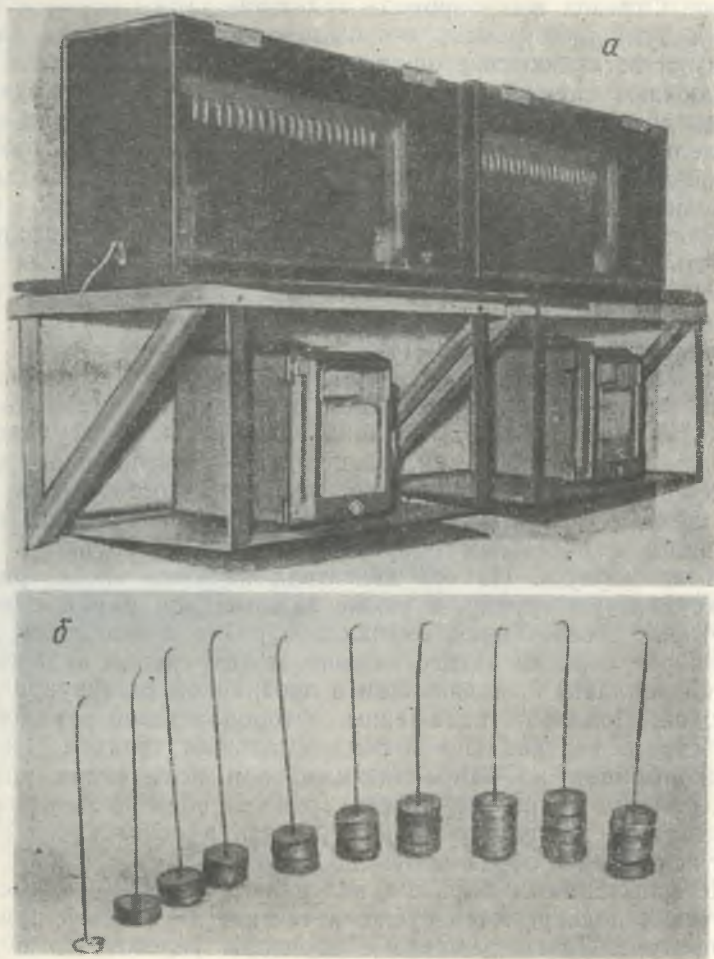


Рис. 136. Установка для испытания микропровода на длительную прочность:

a — общий вид испытательного стенда; *б* — нагрузочные шайбы

ния проводятся следующим образом. В нижней части П-образных рамок прокалываются отверстия для крючков таким образом, чтобы нагружение происходило строго по оси образца. При помощи набора шайб на стержне набирается необходимый вес, затем стержни взвешив-

ваются на аналитических весах АДВ-200М с точностью до 0,01 Г. Рамочки, с подвешенными на них нагрузками, вставляются верхней частью в зажимы установки так, чтобы все нагрузки висели строго на одном уровне. Под нагрузки подводится укрепленная на штативе планка. При помощи микрометрического винта планка поднимается до соприкосновения с грузиками. Бумажные рамочки осторожно разрезаются и планка плавно опускается. В этот же момент включается самописец. При обрыве образца груз падает на наклонную планку, которая, надавливая на контакт, замыкает цепь и на ленте самописца появляется соответствующая отметка. Затем грузик скатывается с планки и цепь размыкается. Скорость движения ленты 180 мм/час, вследствие чего время обрыва образца определяется с точностью до 20 сек.

При исследовании влияния среды на механические характеристики микропровода используют камеры тепла и влаги, камеры холода, криостаты, эксикаторы и другие устройства, предназначенные для создания соответствующих условий при испытании элементов радиоэлектронной аппаратуры.

§ 3. Измерение погонного и удельного сопротивления, общего сопротивления, ТКС и ТЭДС микропровода

Погонное сопротивление микропровода обычно определяют на отрезках в 100 мм. Для этих целей используют измерительные столики, расстояние между токоподводами которых составляет 100 ± 2 мм [7]. Наиболее часто для получения контакта между микропроводом и токоподводом на измерительные столики устанавливают стальные отполированные пластинки или цилиндры в специальных винтах, обеспечивающих их вертикальное возвратно-поступательное движение. При опускании последних происходит, одновременно с дроблением изоляции, контактирование микропровода с токоподводами. В лабораторных условиях для создания контакта используется пайка.

При определении общего сопротивления микропровода на бобине контакт между концом и началом отрезка микропровода и токоподводами осуществляется одним из описанных выше способов. В последнее время начали применяться двоянные измерительные столики, которые позволяют совместить процесс получения контакта для измерения погонного сопротивления начала и конца отрезка микропровода, а также его общего сопротивления.

Измерение погонного и общего сопротивления отрезка микропровода осуществляют на обычных мостовых схемах. При этом если величина измеряемого сопротивления достаточно велика (более 100 ом), то погрешность измерения от сопротивления соединительных проводов и переходного сопротивления в контактах пренебрежимо мала. Однако указанные сопротивления могут стать соизмеримыми с контролируе-

мым при измерениях низкоомных отрезков небольшой длины (сопротивлением 0,1 ом и менее). Для измерения сопротивления таких отрезков микропровода применяют контактное устройство, состоящее из двух пар зажимов [17]. Удельное сопротивление жилы микропровода можно вычислить по формуле

$$\rho = 0,08rd^2,$$

где ρ — удельное сопротивление $\text{ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, r — сопротивление отрезка микропровода в 100 мм, ком; d — диаметр жилы микропровода мкм.

Изложенные методы измерения этих параметров обеспечивают определение ρ с относительной погрешностью порядка 15% при $d \leq 3$ мкм. С увеличением d погрешность измерения уменьшается [11]. При измерении ρ микропровода с жилой из проводниковых металлов большую погрешность могут внести колебания температуры окружающей среды и нагрев отрезка током измерительных приборов.

Переходя к методике измерения зависимости электрического сопротивления микропровода от температуры, отметим, что она может определяться на различных образцах: коротких отрезках свободного микропровода [18], на резисторах, намотанных на каркасы и непосредственно на bobинах с микропроводом. Длина образца зависит от последующего использования микропровода. Желательно, чтобы испытательная длина была близка к рабочей и каркас, на который крепится микропровод, был близок по ТКР к рабочему каркасу. Нагрев образцов производят в термостатах, охлаждение — в криостатах, измерение сопротивления — по обычным схемам [19, 20].

Измерение ТКС больших отрезков микропровода имеет определенные особенности, связанные с погрешностями измерения сопротивления от токов утечки на каркас [21]. При $t = 80^\circ\text{C}$ последние могут достигать 5—9%. Поэтому для обеспечения высокой точности и скорости измерения ТКС больших отрезков микропровода его измеряют на стеклянных bobинах со специальной обмоткой.

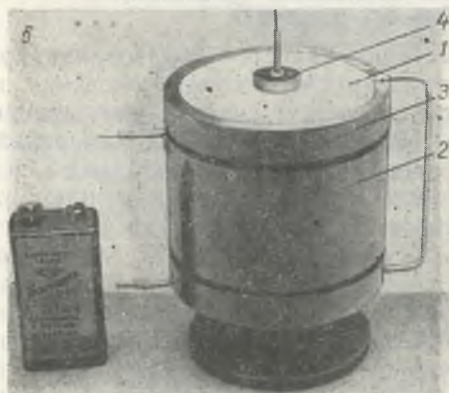
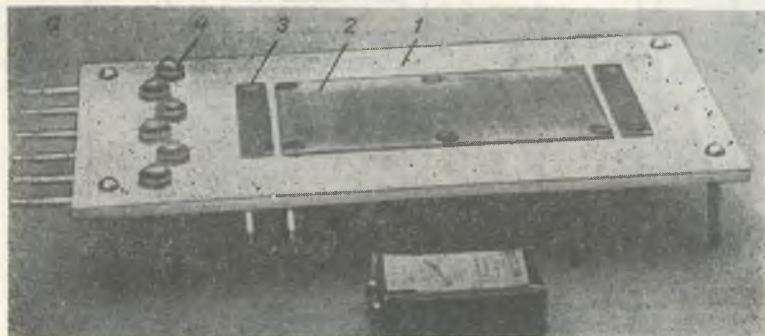
Широкое распространение получил метод измерения ТКС микропровода на отрезках. Схемы и аппаратура этого способа измерения описаны в главе VIII.

Измерение ТЭДС микропровода особых трудностей не вызывает. При определении этого параметра используются методы, принятые при исследовании термоэлектрических свойств материалов [22]. Для осуществления спая между микропроводом и медью применяют припой ПОС-40.

§ 4. Измерение электрических свойств изоляции

Для определения пробивного напряжения изоляции на металлический полированный каркас наматывается несколько витков микропровода. Испытание микропровода с $D \leq 100$ мкм производится на каркасах диаметром 50 мм, при $D > 100$ мкм используются каркасы диамет-

ром 100 мм. Один конец микропровода прикрепляется пайкой или сваркой к контакту, изолированному от корпуса каркаса. Для создания натяжения при намотке к свободному концу микропровода подвешивается грузик весом 10^{-5} н на каждые 10 мкм диаметра по изоляции. После намотки небольшой участок последнего витка прикрепляется к каркасу цапон-лаком. Грузик снимается после просушки лака. Испытательное напряжение переменного или постоянного тока прикладывается между жилой микропровода и каркасом и плавно повышается со скоростью порядка 100 в/сек [23, 24].



Р и с. 137. Приспособление для измерения сопротивления стеклоизоляции на обычных (а) и длинных (б) микропроводах:

1 — фторопластовый изолятор;
2 — измерительный электрод;
3 — охранные электроды; 4 — контакты для припайки микропровода — электроды высокого потенциала

При измерении других электрических параметров стеклянной изоляции — электропроводности, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь — в качестве электродов используется суспензия графитового порошка тонкого помола в черной туши [25]. Проводящая суспензия изготавливается по методике, изложенной в [26]. Вязкость суспензии должна быть порядка 100 пз. Для нанесения электрода микропровод располагают на посеребренной пластине, на которую по всей длине предварительно наносится суспензия узкой полоской, шириной в несколько миллиметров. Длина пластинки выбирается равной длине наносимого на микропровод электрода. Сверху микро-

провод также покрывается суспензией. Сушка суспензии производится на воздухе. Являясь составной частью электрода, пластинка одновременно служит держателем для исследуемого микропровода и при соответствующей конструкции может использоваться в качестве контакта для присоединения к измерительной схеме.

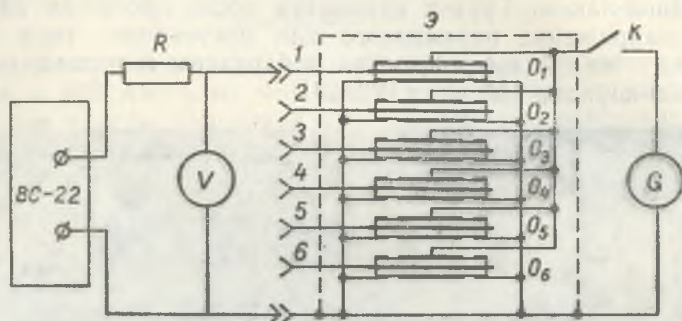


Рис. 138. Схема гальванометрического метода измерения сопротивления стеклоизоляции микропровода: $O_1—O_6$ — образцы микропровода с измерительными, охранными и высоковольтными электродами:

1—6 — контакты высоковольтных электродов; BC-22 — стабилизированный выпрямитель; R — защитное сопротивление; V — вольтметр; Э — экран; K — ключ; G — гальванометр

Недостатком описанного электрода является образование при высыхании суспензии микропор на поверхности соприкосновения изоляции с электродом, что приводит в конечном счете к уменьшению емкости образца примерно на 10%. Поэтому для точных измерений применяют электроды из свинца, олова или из легкоплавких сплавов. В этом случае испытуемый отрезок микропровода помещают в ванночку, изготовленную из посеребренной листовой меди или латуни с расплавленным в ней металлом. В качестве охранных электродов используют пластинки с суспензией. Длина испытуемого отрезка микропровода порядка 50 мм [27]. При исследовании зависимости электрического сопротивления стеклянной изоляции от температуры, применяется приспособление, представленное на рис. 137 [28]. Приспособления с приготовленными образцами помещаются в термостат, а там уже предприняты меры для предотвращения утечек (фторопластовые изоляторы с $R_{из} > 10^{16}$ ом). Измерения производят двумя методами: с помощью тераомметра типа Е6-3 с напряжением 105 в и гальванометрическим способом при напряжениях от 600 до 1400 в по схеме рис. 138 и температурах 20—150°C. При использовании тераомметра удельное объемное сопротивление определяют по формуле

$$\rho = \frac{2\pi (l + g) R}{\ln \frac{D}{d}}$$

где l — длина измерительного электрода, g — зазор между охраняемым и измерительным электродами, R — сопротивление стеклоизоляции. При использовании гальванометрического метода ρ определяется:

$$\rho = \frac{2\pi(l+g)}{C_1 \ln \frac{D}{d}} \cdot \frac{u}{\alpha},$$

где u — напряжение, приложенное к стеклоизоляции, в; C_1 — постоянная гальванометра по току, а/мм; α — отклонение светового указателя гальванометра, мм.

Для измерения сопротивления стеклянной изоляции длинных отрезков микропровода его размещают на поверхности латунного поло-

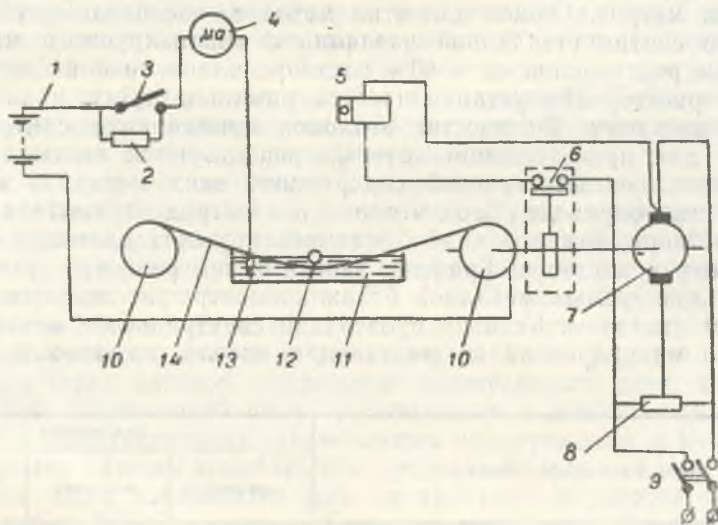


Рис. 139. Принципиальная схема установки для определения точечных повреждений изоляции:

1 — батарея; 2 — сопротивление; 3 — выключатель; 4 — микроамперметр; 5 — счетчик импульсов (электрохимический); 6 — прерыватель; 7 — двигатель; 8 — потенциометр; 9 — выключатель; 10 — bobина; 11 — ванна с водой; 12 — ролик; 13 — электрод; 14 — микропровод

го цилиндра, или измерительного электрода, в виде намотки с шагом 50 мкм. И в этом случае измерение производят тераомметром [21].

Проверку целостности изоляции и определение количества точечных повреждений проводят на установке, принципиальная схема которой показана на рис. 139 [25]. Исследуемый отрезок микропровода пропускают через ванну с водой со скоростью 10—15 м/мин. Между жилой и электродом, опущенным в воду, прикладывается напряжение порядка 60 в, при этом к жиле присоединяют «минус», а к электроду —

«плюс» источника постоянного тока. Количество точечных повреждений определяется по числу отклонений микроамперметра, а расстояние места повреждения от начала определяется при помощи импульсного счетчика.

§ 5. Методы исследования химического состава микропровода

Из всех известных методов количественного анализа материалов [29] в настоящее время используются спектральный и химический для изучения состава микропровода.

Методы спектрального анализа микропровода с жилой из марганца и из сплава на никелевой основе, легированного хромом и кремнием, описаны в [30—32]. Длина исследуемого отрезка не превышает нескольких метров. Общее для этих методов — необходимость предварительного снятия стеклянной изоляции с анализируемого микропровода путем растворения ее в 40% растворе плавиковой кислоты. Длительность растворения устанавливается опытным путем и зависит от толщины изоляции. В качестве эталонов применяются синтетические растворы, для приготовления которых используются чистые металлы в пропорции, соответствующей содержанию этих металлов в анализируемом микропроводе. Ввод эталона в электрод осуществляется как в виде раствора, так и в виде бумажных кружков диаметра 3—4 мм, пропитанных в растворе. Графики зависимости разности почернений линий анализируемых металлов от их концентрации строятся по синтетическим эталонам. Условия проведения спектрального анализа марганцевого микропровода на марганец и никель показаны в таблице.

Таблица

Условия фотографирования	Вид разряда		
	дуговой	искровой	высокочастотный
Тип генератора	ДГ-2	ИГ-2 (ИГ-3)	ДГ-2
Тип спектрографа	ИСП-28	ИСП-28	ИСП-28
Режим генератора:			
сила тока в первичной цепи, а	5	1,6	0,6
емкость, мкф	—	0,005	—
самоиндукция, мГн	—	0,15	—
Межэлектронный промежуток, мм	2	3	1,5
Время предобызкирования, мин.	—	1,0	1,0
Время экспозиции, мин.	4,0	1,0	1,5
Система освещения	3-линзовая	3-линзовая	3-линзовая

При спектральном анализе микропровода из сплавов, компоненты которого трудно перевести в раствор, нашел применение метод сжигания порошкообразной пробы, для получения которой используется очищенный от изоляции микропровод, в дальнейшем разрезающийся

на короткие отрезки, растираемые и перемешиваемые в агатовой ступке с порошком графита в пропорции 1:5 (по весу). Для анализа используются графитовые электроды, имеющие форму «стакана». Поверхность проб смачивается коллодием во избежание выброса анализируемого материала. В качестве примера можно привести условия анализа порошкообразной пробы микропровода на хром, кремний, железо, описанные в [32]. В этом случае анализ производился на спектрографе ИСП-28 с генератором ДГ-2, величиной тока 5 а, дуговым промежутком 2 мм, обжигом 10 секунд, экспозицией 40 секунд.

Описанные методы могут использоваться и при анализе других микропроводов с корректировкой режимов в каждом случае в зависимости от химического состава анализируемого микропровода.

В [33] предложен метод химического анализа медного микропровода для определения содержания в нем окислов и чистой меди [34]. Для анализа используется навеска не менее 3 мг, что позволяет определять усредненный химический состав на отрезках микропровода значительной длины. Однако, как указывает академик Ю. С. Ляликов, практика применения и исследования свойств микропровода выдвигает задачу уменьшения навески, используемой для анализа.

Более совершенен метод анализа микропровода, предложенный в [35]. Тщательно измельченный в агатовой ступке микропровод помещается в установку, представляющую собой фильтр Шотта № 4, вставленный в колбу-приемник. В сосуд, где происходит растворение, через отверстие вливается растворитель: 25% NH_4Cl (для Si_2O) и HCl (для CuO). Эти растворители, наиболее полно извлекая исследуемые фазы, служат одновременно фоном для их определения на ртутном капаящем электроде. Через раствор непрерывно пропускается азот, а раствор, содержащий извлеченную фазу, отсасывается с помощью насоса Комовского в колбу-приемник, являющуюся одновременно и мерной колбой. Величина навески колеблется в пределах 50 мкг — 1 мг.

Закись меди извлекается при пятикратной обработке 25% горячим раствором NH_4Cl , каждая обработка проводится 2 мл раствора в течение трех минут. Окись меди извлекается при трехкратной обработке горячим раствором HCl . После этого чистая медь сплава растворяется в HNO_3 , а силикат меди остается нерастворенным. Определение меди производится на фоне 1 м $\text{NH}_4\text{OH} + 1$ м NH_4Cl методом переменноточковой полярографии; определение меди в виде силикатов производится на фоне 1МКС № 5, когда она при потенциале 0,45 в дает полярограмму, соответствующую двухэлектронному процессу [35]. Ошибка определений (в этом методе) составляет для Si_2O , CuO и Cu силикат — 14—19%, для чистой меди — 3%.

§ 6. Методы исследования структуры микропровода

Для исследования структуры микропровода используются методы металлографического [36, 37], электронномикроскопического [38, 39] и рентгеноструктурного анализа [40].

Изготовление шлифов непосредственно из микропровода для проведения металлографического анализа не представляется возможным ввиду малых размеров исследуемого объекта. В связи с этим образец помещают в нейтральную среду и в дальнейшем обрабатывают как одно целое. В качестве среды применяют быстротвердеющий пластик стиракрил марки ТШ, состоящий из порошка и жидкости, смешанные перед употреблением в соотношении 2 : 1 [36]. Стиракрил помещают в формочку, куда вставляют предназначенные для исследования отрезки микропровода и подвергают спеканию под давлением 20—100 н/см в течение 10 минут при температуре порядка 100°С. В дальнейшем образцы общепринятыми методами подготавливают для металлографического исследования [41].

Исследования структуры проводят на микроскопах МИМ-7, МИМ-8а в светлом и темном поле при увеличениях 100—1350 \times в зависимости от диаметра изучаемого микропровода. Фотографирование осуществляют с увеличением 100—2000 \times .

Для электронномикроскопического исследования поперечного среза микропровода его помещают на прямоугольную проволочную рамку, которую погружают в тигель с расплавленным полистиролом. После затвердения полистирол с заплавленным в нем микропроводом извлекается из тигля и распиливается на две части таким образом, чтобы плоскость расплава была перпендикулярна микропроводу. Шлифовка и полировка образцов производится обычными способами, принятыми при металлографических исследованиях металлов и сплавов [41].

Травитель подбирается в зависимости от материала жилы. Например, травление шлифов манганинового микропровода можно производить раствором хлорного железа в соляной кислоте, разбавленной несколько раз водой или спиртом [39]. Особое внимание следует обратить на длительность травления, так как в противном случае жила травливается настолько, что образуются углубления в месте ее расположения, препятствующие в дальнейшем рассмотрению самого шлифа, а также снятию реплик с него. После травления шлифы необходимо тщательно промыть; в случае манганинового микропровода они промываются в этиловом спирте. В качестве материала (при электронномикроскопических исследованиях) можно использовать титановые и угольные реплики.

Титановая реплика образуется путем ее термического испарения и конденсации на поверхности шлифа в вакууме порядка 10^{-5} мм рт. ст. В качестве испарителя применяется корзинка из вольфрамовой проволоки диаметром 0,6 мм. Корзинка располагается на расстоянии 50—60 мм от поверхности шлифа. Испарение титана производится при пропускании через испаритель тока порядка 20—30 а в течение 30—60 секунд. При соблюдении описанного режима толщина реплики составляет 200—400 Å. Реплика снимается со шлифа при помощи желатина, после чего многократно промывается дистиллированной водой. Для рассмотрения в электронном микроскопе реплика помещается на

подложку, представляющую медную фольгу с отверстиями (30 шт/мм²).

Титановые реплики позволяют производить измерение геометрических параметров микропровода, определять геометрию поперечного сечения жилы и стеклянной изоляции, при этом используется дифракционная решетка с 600 делениями на мм, однако при больших увеличениях ($\times 5000$) изучение микроструктуры жилы затруднено из-за видимости собственной микроструктуры реплик. В связи с этим при исследованиях микроструктуры с увеличением до $10\,000\times$ рекомендуется применять угольные реплики. Испарение производится в вакууме из контакта двух спектрографических углей, между которыми пропускается переменный ток силой 15—20 а. Для получения реплик толщиной 100—200 Å процесс испарения продолжается 2—4 минуты. Ввиду малого контраста угольных реплик при пользовании ими производится отнение хромом. Однако если в этом случае наблюдается сильный контраст, то отнение хромом не применяется, а для отнения рельефа поверхности достаточно угольную реплику напылять под углом 25—30° к поверхности шлифа. Дальнейшие исследования производятся обычным путем на электронных микроскопах ЭМ-3, ЭМ-7 и др. [42].

Проведение рентгеноструктурного анализа микропровода возможно двумя способами: фотографическим и ионизационным [40]. В первом случае ввиду микронных размеров микропровода, затрудняющих обнаружение Лауэ-пятен, применяется обычный метод качания кристалла. Использование этого метода приводит к большой затрате времени (до 12 часов на одну рентгенограмму). При ионизационном способе исследование производится на дифрактометре УРС-50. Микропровод укрепляется на гониометрической головке вдоль оси вращения гониометра. Счетчик с широкой щелью ставится на угол, соответствующий отражению от определенной плоскости. Изменение интенсивности регистрируется счетчиком в зависимости от угла вращения образца, при этом для медного микропровода используется отфильтрованное медное излучение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Я. Бадинтер, С. И. Балабан. Удельное сопротивление манганинового микропровода в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 1. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1962, 44—50.
2. А. Ф. Зак. Физико-химические свойства стеклянного волокна. М., Ростехиздат, 1962.
3. С. К. Зотов, О. Б. Клешко, Э. С. Радченко. Фотоэлектронный микрометр для измерения диаметра движущегося микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. II. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1964, 96—108.
4. З. В. Литвак, Л. А. Почапская. О геометрии микропровода в стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VI. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1969, 133—143.
5. Г. Я. Мирский. Аппаратное определение характеристик случайных процессов. М., «Энергия», 1967.

6. А. Ф. Зимодро, В. В. Шубин, В. Н. Доватор, А. И. Данилов, А. Е. Шерстобитов. Контроль геометрических параметров микропроводов на основе измерения отношения диаметров $\frac{d_n}{d_j}$. Электронная техника, серия «Радиокомпоненты», вып. 2, 1966, 134—140.
7. Т. И. Григорьева. Определение свойств микропровода в стеклянной изоляции. Достижения в области разработки, производства и применения микропровода в стеклянной изоляции. М., ЦИНТИ Электропром, 1962, 95—105.
8. С. З. Бокштейн, С. Т. Кишкин, И. Л. Светлов. Испытание нитевидных кристаллов меди, никеля и кобальта на разрыв при растяжении. Исследования по высокопрочным сплавам и нитевидным кристаллам. М., Изд.-во АН СССР, 1963, 33—45.
9. Н. Р. Берман, М. В. Гивельберг, В. Г. Чебан. Разрывная прочность микропровода. Изв. АН МССР, серия физико-технич. и матем. наук, 1969, № 3, 39—39.
10. П. А. Самосудов, Г. Л. Рошкован, А. И. Шабаев. Масштабный эффект в стеклянных капиллярах, полученных микролитьем по методу А. В. Улитовского. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VIII. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1971, 60—66.
11. А. И. Одине, И. М. Копьев. Прочностные свойства нитевидных кристаллов. Металловедение и термическая обработка, 1961, № 9.
12. Н. Р. Берман, М. В. Гивельберг, В. Г. Чебан. Прочностные свойства микропровода при изгибе. Изв. АН МССР, серия физико-технич. и матем. наук, 1969, № 3, 65—68.
13. М. А. Потапов. Определение наименьшего радиуса изгиба микропровода в сплошной стеклянной изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. I. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967.
14. В. С. Тюньков, Л. Д. Фирсова. Установки контроля параметров микропроводов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VIII. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1970, 90—98.
15. Ю. И. Аввакумов. Кручение микропровода при безынерционной смотке. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 206—213.
16. Н. Р. Берман, М. В. Гивельберг, В. Г. Чебан. Исследование прочности микропровода при кручении. Изв. АН МССР, серия физико-технич. и матем. наук, 1971, № 3, 69—72.
17. Д. А. Чунин. О способе измерения удельного электросопротивления низкоомных отрезков микропровода. Электронная техника, серия «Радиокомпоненты», вып. 2, 1968, 85—89.
18. З. И. Зеликовский, Е. А. Серний. Метод и аппаратура для измерения температурного коэффициента сопротивления микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. I. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1962.
19. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М., Госэнергоиздат, 1963.
20. А. Ф. Городовский. Мосты постоянного тока. М.—Л., «Энергия», 1964.
21. И. Ф. Драбенко. Метод измерения ТКС больших отрезков микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VIII. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1971, 98—102.
22. Б. Г. Лившиц. Физические свойства металлов и сплавов. М., Машгиз, 1959.
23. Микропровода медные литые в стеклянной изоляции ММЛС. ЮБЮ.664.000ТУ, редакция I—66.
24. Л. А. Дидковская, И. Ф. Драбенко. Зависимость времени до пробоя стеклоизоляции микропровода от величины приложенного напряжения и температуры. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 167—172.
25. В. П. Максим. Методика измерения электрических параметров стеклянной изоляции микропроводов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 159—162.

26. Материалы электроизоляционные твердые. ГОСТ 6433—65.
27. С. Н. Димитраки, Э. И. Зеликовский. Влияние нагрева при намотке по заданному сопротивлению резисторов из остеклованного микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 263—270.
28. И. Ф. Драбенко, Е. А. Серний. Электрическое сопротивление стеклоизоляции марганцевого микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. VI. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1969, 128—132.
29. Ю. С. Ляликов. Физико-химические методы анализа. М., Госхимиздат, 1960.
30. В. П. Сычев, Л. С. Михайлова. Количественный спектральный анализ марганцевого микропровода. Заводская лаборатория, 1962, № 8, 35—38.
31. Н. Ф. Захария, Ц. А. Лейдерман. Спектральный анализ марганцевого провода (определение марганца и никеля). Микропровод и приборы сопротивления, вып. I. Кишинев, «Штиинца», 1962, 39—43.
32. Е. В. Зверева, Л. А. Садовникова. Спектрографическое определение кремния, хрома и железа в микропроводе из сплава NiCr—FeSi(Ni—Cr—Si). Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 146—149.
33. А. С. Славатинский. Определение содержания закиси меди, металлической меди и стекла в остеклованных микропроводах. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 150—153.
34. В. Н. Подгайнова. Определение закиси, окиси и металлической меди в медных порошках. ЖАХ, VII, 5, 1952.
35. И. В. Аронина. Изв. АН МССР, серия «Химия», 1967, № 10.
36. А. А. Буренина, Н. Я. Карасик, И. М. Касаткина, В. П. Матвеев. Металлографическое исследование капель и микропроводов из меди. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 65—72.
37. А. Е. Пleshкова, В. П. Щербаков. О структуре жилы медного микропровода в стеклянной изоляции. Вопросы радиоэлектроники, серия III, Детали и компоненты аппаратуры, вып. 10, 1964, 106—116.
38. Н. Я. Карасик, Н. Е. Фаддеева. Электронномикроскопическое исследование структуры микропроводов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1966, 138—145.
39. В. Н. Мильявская. Электронномикроскопическое исследование микропроволаки. Достижения в области разработки, производства и применения микропроволаки в стеклянной изоляции. М., ЦИНТИ Электропром, 1962, 72—80.
40. Э. М. Надгорный, Б. И. Смирнов. К вопросу о структуре микропроволаки меди. ФТТ, 1, 12, 1960, 1112.
41. М. В. Мальцев, Т. А. Барсукова, Ф. А. Борин. Металлография цветных металлов и сплавов. М., Металлургиздат, 1960.
42. Г. Томас. Электронная микроскопия металлов. М., ИЛ, 1963.

МЕТОД ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НИТИ

§ 1. Принцип метода

При исследовании физических свойств микропроводов при температуре, равной или превышающей температуру окружающей среды, получил широкое распространение метод «горизонтальной нити» [1]. Этот метод позволяет определить главным образом следующие зависимости и параметры микропровода: изменение сопротивления образца от изменения температуры $\delta R = f(\theta)$ и тем самым температурный коэффициент электрического сопротивления; изменение длины образца от изменения температуры $\delta L = f(\theta)$ и тем самым температурный коэффициент линейного расширения. Кроме того, этот метод используют для определения изменения сопротивления отрезка при его растяжении $\delta R_1 = f(\varepsilon)$ и, следовательно, коэффициента тензочувствительности, изменения длины отрезка при его растяжении $\delta L_1 = f(F)$. В приведенных зависимостях приняты следующие обозначения: δR — относительное изменение сопротивления отрезка, вызванное нагревом его до температуры $t_0 + \theta$ при заданном (в частности, минимальном) удлинении отрезка от растяжения ε_0 и температуре окружающего воздуха t_0 ; δL — относительное удлинение отрезка, вызванное нагревом его до температуры $t_0 + \theta$ при заданном (в частности, минимальном) удлинении отрезка от растяжения ε_0 и температуре окружающего воздуха t_0 ; δR_1 — относительное изменение сопротивления отрезка, вызванное удлинением его ε от растяжения при заданной (в частности, минимальной) температуре отрезка $t_0 + \theta$; δL_1 — относительное удлинение отрезка, вызванное растягивающим усилием F при заданной (в частности, минимальной) температуре отрезка $t_0 + \theta$. Определение указанных зависимостей связано с измерением сопротивления и относительного изменения сопротивления отрезка, длины и относительного удлинения отрезка, температур отрезка и среды, приложенного к отрезку усилия.

В основу указанного метода положен нагрев достаточно длинного горизонтально расположенного отрезка микропровода в условиях ес-

тественной конвекции. Отрезок микропровода нагревают электрическим током и по мощности, выделяющейся на отрезке, и условиям теплоотдачи судят о средней температуре отрезка. Таким образом, температуру отрезка не измеряют, а задают.

Измерение остальных параметров производится обычными методами, описанными ниже.

Особенности метода горизонтальной нити: чрезвычайная простота подготовки образца; возможность измерения всех рассматриваемых физических зависимостей и параметров в одно и то же время и на одном и том же отрезке микропровода; быстрота проведения измерений, так как скорость нагрева отрезка микропровода обычно не превышает 0,1 секунды и возможна быстрая смена температурного режима; достаточная точность определения зависимостей для подавляющего большинства применений микропровода. Эти особенности обеспечили широкое распространение метода при создании разнообразной аппаратуры для исследований микропровода в лабораторных условиях и контроля микропровода в цеховых условиях. За последние годы метод горизонтальной нити распространяется и на исследования фильерных микропроводов и микролент.

§ 2. Тепловой режим

Основная задача теплового расчета в методе горизонтальной нити — определить мощность, необходимую для нагрева отрезка микропровода до заданной температуры, и оценить точность расчета. Эта задача сводится к анализу теплоотдачи достаточно длинного горизонтального цилиндра в условиях свободной конвекции. Температура такого цилиндра

$$t = t_0 + \Theta, \quad (8.2.1)$$

где t_0 — температура окружающей среды, Θ — нагрев отрезка при выделении на нем мощности P . При конвективном теплообмене

$$\Theta = \frac{P}{k\pi D l}$$

Здесь k — коэффициент теплоотдачи конвекцией, l — длина отрезка, D — диаметр микропровода по изоляции. Введем критерий Нуссельта:

$$[\text{Nu}] = \frac{kD}{\lambda},$$

где λ — коэффициент теплопроводности окружающей среды, вт/м·град. Тогда

$$\Theta = \frac{P}{\pi \lambda [\text{Nu}] l} \quad (8.2.2)$$

Из (8.2.1) и (8.2.2) следует, что температура отрезка микропровода определится пятью параметрами: t_0 , P , $[Nu]$, λ , l . Точность, с которой будут известны эти параметры, определит и точность установки температуры отрезка микропровода. Потери на теплопроводность и лучеиспускание ввиду их малости, так как отрезок достаточно длинный и достаточно тонкий, можно учесть введением независимых поправок δ_k и δ_l . Кроме того, необходимо учесть и наличие стеклянной изоляции (поправкой δ_c). Таким образом, температура отрезка

$$t = t_0 + \frac{P}{\pi \lambda [Nu] l} (1 + \delta_k + \delta_l + \delta_c). \quad (8.2.3)$$

Рассмотрим величины, входящие в последнее выражение.

Температура окружающей среды. В задачах теплообмена рассматривают две температуры окружающей среды: t_0 — температура окружающей среды на достаточном удалении от отрезка микропровода и t_m — средняя температура окружающей среды.

Отрезок микропровода размещают в термостате для исключения влияния возможных потоков воздуха. Стенки термостата располагаются на расстоянии 30—60 мм от отрезка микропровода. Учитывая эллиптический характер теплового поля нагретой горизонтальной нити (в плоскости, перпендикулярной ее сечению), эту нить располагают ближе к нижней стенке термостата в соотношении 1:2. Термостат не должен искажать теплового поля нити, полностью передавать тепло от нити в окружающее пространство. Поэтому его выполняют в виде достаточно тонкого (2—4 мм) металлического защитного кожуха. Температура стенки термостата в первом приближении может рассматриваться как t_0 , тем более что диаметр пленочного слоя составляет не более 100 диаметров нити [2]. Поэтому термометр для измерения t_0 можно расположить внутри термостата, около его стенки. Однако исследования длительных процессов теплового воздействия показали, что температура в термостате начинает постепенно возрастать. Так, например, при $\theta = 500^\circ\text{C}$ температура в термостате возрастает примерно со скоростью 10 град/час и через 3—4 часа доходит до $50\text{—}60^\circ\text{C}$ при $t_0 = 20^\circ\text{C}$ (в помещении). При этом температура нити изменяется всего на $1\text{—}2^\circ\text{C}$. Таким образом, в качестве t_0 следует, по-видимому, принимать температуру около измерительной установки. Поэтому, ее определение с погрешностью менее $0,5^\circ\text{C}$ не имеет смысла. Из-за существенной зависимости от температуры теплофизических параметров среды, а учет ее чрезвычайно сложен, обычно относят все параметры к средней арифметической температуре теплового слоя, окружающего отрезок:

$$t_m = t_0 + 0,5 \theta. \quad (8.2.4)$$

В условиях метода горизонтальной нити θ задано, поэтому t_m имеет известное наперед значение, что значительно облегчает решение задачи. К температуре t_m относят теплопроводность среды, критерий Нус-

сельта, теплопроводность жилы микропровода. В дальнейшем индекс m — значение параметра при температуре t_m .

В методе горизонтальной нити вводят еще t_n — начальную температуру отрезка микропровода

$$t_n = t_0 + \theta_n, \quad (8.2.5)$$

где θ_n — начальный нагрев отрезка, необходимый для исходного изменения его сопротивления с заданной чувствительностью. Обычно $\theta_n = 1-5^\circ\text{C}$. Учитывая погрешность t_0 и необходимость в θ_n , наименьшая температура перегрева нити, при которой начинают изучение $R(\theta)$ и $L(\theta)$, обычно составляет $20-30^\circ\text{C}$.

Критерий Нуссельта. Известно, что для теплоотдачи в условиях свободной конвекции [2]

$$[\text{Nu}] = f[\text{Gr} \cdot \text{Pr}],$$

где $[\text{Gr} \cdot \text{Pr}]$ — произведение критериев Грасгофа и Прандтля соответственно. В свою очередь

$$[\text{Gr}] = D^3 \theta g \beta_m / \nu_m^2,$$

g — ускорение силы тяжести, β_m — коэффициент объемного расширения среды, ν_m — коэффициент кинематической вязкости среды. Значения ν_m и $[\text{Pr}]_m$ приводятся в таблицах, а $\beta_m = 1/(273+t_m)$. Возможные значения $[\text{Gr} \cdot \text{Pr}]$ для метода горизонтальной нити ($\theta = 1-1000^\circ\text{C}$, $D = 3-30$ мкм, среда — воздух) находятся в пределах $10^{-8} - 10^{-3}$. Обычно считают, что при этом $[\text{Nu}]$ остается постоянным, равным 0,5 [3, 4]. На возможное постоянство $[\text{Nu}]$, т. е. на отсутствие конвекции в неподвижном тепловом слое, указал еще Лэнгмюр [5]. Однако специальные исследования, проведенные в КНИИЭП [6], показали, что для $[\text{Gr} \cdot \text{Pr}] = 10^{-8} - 10^{-3}$:

$$[\text{Nu}] = 0,93 [\text{Gr} \cdot \text{Pr}]^{1/12}. \quad (8.2.6)$$

Общепринятое спрямление в логарифмических координатах не столь удобно, как полулогарифмическое, так как изменения $[\text{Nu}]$ в этой области малы. Для инженерных расчетов можно рекомендовать приближение [7]:

$$[\text{Nu}] = 0,155 - \frac{1}{\lg[\text{Gr} \cdot \text{Pr}]}. \quad (8.2.7)$$

Погрешность аппроксимации формулы для $[\text{Gr} \cdot \text{Pr}] = 1 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-3}$ оценивается в 2%. График зависимости (8.2.7) приведен на рис. 140.

Для упрощения расчетов $\lg[\text{Gr} \cdot \text{Pr}]$ представляют в виде суммы двух слагаемых, одно из которых зависит от θ и параметров среды, а другое только от диаметра микропровода. В этом случае

$$\lg[\text{Gr} \cdot \text{Pr}] = 3 \lg D + \lg \left\{ \frac{9,81 \theta [\text{Pr}]_m}{\nu_m^2 (273 + t_0 + 0,5 \theta)} \right\}.$$

Оба слагаемых легко табулируются.

Чрезвычайно важно отметить, что благодаря малому изменению $[Nu]$, определение $[Gr \cdot Pr]$ может производиться относительно неточно. Например, при изменении диаметра от 12 до 25 мкм, а это диапазон диаметров по изоляции для литого резистивного микропровода (диа-

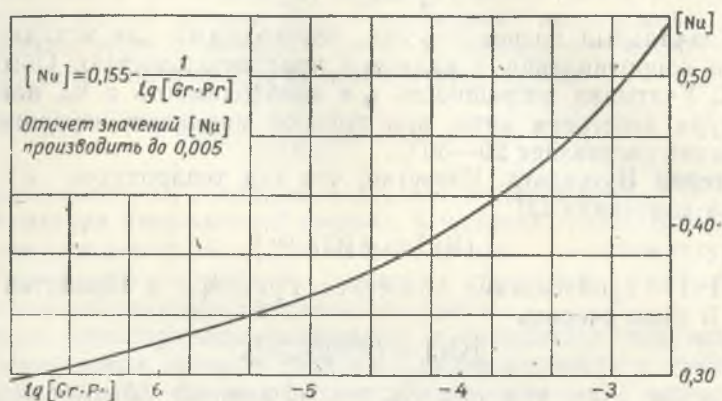


Рис. 140. Зависимость критерия $[Nu]$ от критериев $[Gr \cdot Pr]$

метр жилы от 2 до 16 мкм), критерий $[Gr \cdot Pr]$ меняется в десять раз, а критерий $[Nu]$ изменяется от среднего значения всего на 10%. Это приводит к тому, что при сравнительно неточном производственном контроле диаметр микропровода может вообще не учитываться, а приниматься постоянным (например, равным 18 мкм). При измерениях наивысшей точности учет диаметра микропровода можно рекомендовать по шкале $R10$ ряда предпочтительных чисел от 3 до 30 мкм, а далее через каждые 5 мкм до 60—80 мкм. При этом погрешность от неопределенности значения $[Nu]$ не превысит 0,5%.

Коэффициент теплопроводности среды. Обычно отрезок микропровода размещают в воздушной среде. Однако для высоких температур при длительных испытаниях можно применять аргон. Коэффициенты теплопроводности воздуха и аргона приводятся в известных таблицах Варгафтика. Анализ «гладкости» этих данных для воздуха и сопоставление различных таблиц показали, что наиболее приемлемой является формула, предложенная в [7]:

$$\lambda = 0,0243 (1 + 0,0032 t_m - 0,000001 t_m^2), \text{ вт/м} \cdot \text{град.} \quad (8.2.8)$$

Погрешность формулы не более 0,5%.

Длина отрезка микропровода. При креплении испытуемого отрезка микропровода пайкой или прижимом размер каждой контактной площадки составляет обычно 0,5—1 мм. Это приводит к неопределенности длины отрезка за счет контактирования в пределах $0,7 \div 1,5$ мм. При укладке отрезка необходимо обеспечить некоторый провис, так как

первоначальный натяг может внести существенную погрешность в измерение, например, ТКС. Удлинение отрезка за счет провиса, исходя из уравнения цепной линии, будет

$$\Delta l = \frac{8f^2}{3l^2}, \quad (8.2.9)$$

где f — стрела провиса. Например, для $f=2-7$ мм и $l=0,2$ м, получим $\Delta l=0,03-0,3\%$. Указанные погрешности определяют минимальную допустимую длину отрезка микропровода. При производственном контроле обычно $l=0,1$ м, при точных измерениях $l=0,2-0,3$ м. Погрешность за счет провиса и контактирования составит в первом случае 1-2%, во втором — 0,5%. Если измеряют параметры натянутого отрезка микропровода, то дополнительное удлинение за счет натяга может внести погрешность не более 0,1-0,3%.

Поправка на охлаждающее влияние концов. Это влияние оценивается при решении дифференциального уравнения установившегося теплового состояния

$$dP_1 + dP_2 + dP_3 = 0, \quad (8.2.10)$$

где dP_1 — мощность, выделяемая на участке dx отрезка электрическим током, dP_2 — мощность, отдаваемая элементом dx путем конвекции, $dP_2 = -\pi\lambda[\text{Nu}]\theta dx$, dP_3 — мощность, получаемая элементом dx от соседних участков микропровода (по оси). По закону Фурье

$$dP_3 = \left[\lambda_{ж} \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} \frac{\pi d^2}{4} \right] dx,$$

где $\lambda_{ж}$ — коэффициент теплопроводности материала жилы микропровода, d — диаметр жилы микропровода, θ_x — перегрев на расстоянии x по оси от начала отрезка, $0 \leq x \leq l$. Уравнение (8.2.10) принимает вид

$$\Delta^2 \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} - \theta_x + \theta_\infty = 0, \quad (8.2.11)$$

где

$$\theta_\infty = \frac{P}{\pi\lambda[\text{Nu}]l} \quad \text{и} \quad \Delta^2 = \frac{\lambda_{ж} d^2}{4\lambda[\text{Nu}]}$$

Решением уравнения (8.2.11) является

$$\theta_x = \theta_\infty \left(1 - \frac{ch \frac{2x-l}{2\Delta}}{ch \frac{l}{2\Delta}} \right). \quad (8.2.12)$$

Средняя температура отрезка

$$\Theta = \frac{1}{l} \int_0^l \theta_x dx = \theta_\infty \left(1 - \frac{2\Delta}{l} th \frac{l}{2\Delta} \right). \quad (8.2.13)$$

Принимая во внимание, что $l \gg 2\Delta$, получим

$$\theta = \theta_{\infty} \left(1 - \frac{2\Delta}{l}\right).$$

Поправка на охлаждающее влияние концов

$$\delta_k = -\frac{d}{l} \sqrt{\frac{\lambda_{жк}}{\lambda [Nu]}}. \quad (8.2.14)$$

Для типичного примера $d=10$ мкм, $l=0,1$ м, $\lambda_{жк}=20$ Вт/м·град (манганин), $\lambda=0,03$ Вт/м·град, $[Nu]=0,45$, получим $\delta_k=0,005$. Как и следовало ожидать, ввиду малости этой поправки, точность ее определения в 20% вполне достаточна. Поэтому можно пренебречь теплопроводностью на концы по стеклянной изоляции, влиянием ТКС на распределение мощности по длине отрезка и др. Поправка δ_k легко табулируется и может учитываться с дискретностью до 0,1—0,2%. Эта поправка ограничивает верхний предел метода горизонтальной нити по диаметру жилы в 80—100 мкм.

Поправка на лучеиспускание. Мощность, отдаваемая отрезком микропровода путем лучеиспускания, по закону Стефана—Больцмана:

$$P_{\lambda} = \varepsilon' C_0 (T^4 - T_0^4) \pi D l, \quad (8.2.15)$$

где ε' — степень черноты микропровода, $C_0 = 5,8 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² град⁴; T и T_0 — температура отрезка и температура среды, °К; $T^4 - T_0^4 = \theta (T^3 + T^2 T_0 + T T_0^2 + T_0^3) = \theta f(T, T_0)$. Поправка на лучеиспускание определяется как отношение потерь на лучеиспускание к потерям конвекцией:

$$\delta_{\lambda} = -\frac{\varepsilon' C_0 \theta f(T, T_0) \pi D l}{\pi \lambda [Nu] l}, \quad (8.2.16)$$

откуда

$$\delta_{\lambda} = -\frac{\varepsilon' C_0 \theta f(T, T_0)}{\lambda [Nu]} D.$$

Определение ε' для остеклованного микропровода достаточно сложно. Однако, ввиду малости поправки δ_{λ} , можно принять $\varepsilon'=0,5$. Для типичного примера $D=20$ мкм, $\lambda=0,05$ Вт/м·град, $[Nu]=0,45$; $T_0=300^{\circ}\text{К}$, $T=500^{\circ}\text{К}$ ($\theta=200^{\circ}\text{С}$), получим $\delta_{\lambda}=0,006$. Указанная поправка возрастет для более высоких температур и больших диаметров и, в связи с неопределенностью ε' , явится основным ограничением метода горизонтальной нити для высоких температур. Для проводов без изоляции ε' материала обычно известно и его погрешность составляет не более 10%. В этом случае при $D \leq 30$ мкм можно обеспечить $\theta \leq 800^{\circ}\text{С}$ при погрешности менее 5%.

Поправка на стеклянную изоляцию. Уравнение (8.2.2) составлено без учета радиального распределения температуры в стеклянной изо-

ляции, температура на поверхности стекла принята равной температуре жилы. Используя уравнение для установившегося перепада температур в длинной трубе [3], получим систему двух уравнений

$$\begin{cases} P = 2 \pi \lambda_c l (t - t_c) / \ln \frac{D}{d}, \\ P = \pi \lambda [\text{Nu}] l (t_c - t_0), \end{cases} \quad (8.2.17)$$

где t_c — температура на поверхности стекла, λ_c — коэффициент теплопроводности стекла, $\lambda_c \approx 1,5$ вт/м·град. Наличие стеклянной изоляции приводит к превышению температуры жилы изолированного микропровода с диаметром по изоляции D по сравнению с температурой неизолированного микропровода диаметром D при одинаковой выделяемой мощности

$$\delta_c = \frac{t - t_c}{t_c - t_0} = + \frac{\lambda [\text{Nu}]}{2\lambda_c} \ln \frac{D}{d}. \quad (8.2.18)$$

Приняв для типичного примера $D/d=3$, $\lambda=0,03$ вт/м·град, $[\text{Nu}]=0,45$, получим $\delta_c = +0,005$. Для любых значений $D/d=1,5-8$ неопределенность в установлении θ после введения поправки не превышает $\pm 0,3\%$.

Оценка точности теплового расчета. Расчет мощности P , необходимой для нагрева отрезка до температуры t , определяется по формуле (8.2.3). В зависимости от требуемой точности, диаметров микропровода и его длины, материалов жилы и параметров окружающей среды формула (8.2.3) табулируется. Громоздкость расчетов делает такую работу совершенно необходимой. Точный учет всех погрешностей расчета температуры отрезка микропровода из-за разнообразия возможных сочетаний параметров микропровода и условий охлаждения в общем виде невозможен. Однако приведенный анализ показывает, что основным фактором неопределенности теплового режима является погрешность в определении критерия Нуссельта. При высоких температурах возрастает погрешность от неопределенности поправки на лучеиспускание. При ограничивающих условиях, приведенных выше, наибольшая погрешность определения температуры отрезка микропровода (метод горизонтальной нити) может быть 3—5%. Длительная эксплуатация установок, сопоставление результатов измерения указанным методом и классическим (внешний нагрев) подтверждают такую оценку.

§ 3. Измерительные схемы

В методе горизонтальной нити основными измеряемыми параметрами являются электрические — мощность, выделяемая на отрезке, и сопротивление отрезка; и механические — длина отрезка и усилие, приложенное к отрезку.

Измерение электрических величин. В основу метода измерения электрических величин положен принцип совмещения в одной измерительной схеме трех операций: нагрева отрезка, измерения мощности и сопротивления. При исследовании зависимости $R(t)$ желательно отсчитывать непосредственно относительное изменение сопротивления образца, при определении температурного коэффициента сопротивления желательно отсчитывать непосредственно этот коэффициент. Поэтому введение простейших вычислительных операций является чрезвычайно желательным при разработке измерительной схемы.

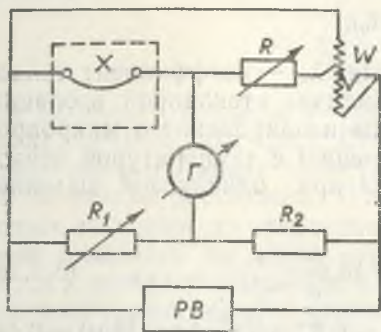


Рис. 141. Схема моста—ваттметра

Как показал анализ, всем указанным требованиям отвечает [1] схема моста-ваттметра, простейший вариант которой приведен на рис. 141. Испытуемый отрезок микропровода включается в плечо уравновешенного моста X , токовая обмотка ваттметра W в плечо R , обмотка напряжения подключается к напряжению питания моста. Мост питается регулируемым источником напряжения PB . Показание ваттметра W и мощность P , выделяемая на отрезке, связаны точной зависимостью

$$W = P(1+k), \quad (8.3.1)$$

где k — отношение сопротивлений плеч нижней ветви моста. Мощность, потребляемая обмотками ваттметра, автоматически исключается из процесса измерения. Мощность, потребляемая обмоткой напряжения, не влияет на точность, так как просто увеличивает потребление от источника питания. Мощность, потребляемая токовой обмоткой, является частью мощности, потребляемой смежным с измерительным объектом плечом. Эта принципиальная особенность схемы обеспечивает простую и точную установку заданной мощности P . В отдельных случаях шкала ваттметра может быть проградуирована непосредственно в градусах. Погрешность, вносимая ваттметром, определяется его классом точности. При классе точности 0,5 эта погрешность составит 0,5—1%. Мостовая схема обеспечивает возможность первоначального уравновешивания схемы изменением сопротивления одного плеча, а последующих уравновешиваний (при нагреве образца) — изменением сопротивления другого плеча. В этом случае шкала плеча R_1 может быть проградуирована непосредственно в относительном изменении сопротивления X . Погрешность отсчета δR без особых затруднений может быть доведена до 0,001—0,0001%.

Измерение температурного коэффициента сопротивления. Зависимость электрического сопротивления R сплавов сопротивления от тем-

пературы t обычно является нелинейной. С достаточной для практики точностью эту зависимость считают квадратичной и записывают в виде

$$R = R_1 [1 + \alpha(t - t_1) + \beta(t - t_1)^2],$$

где t_1 — исходная температура (обычно $t_1 = 20^\circ\text{C}$), R_1 — сопротивление отрезка при температуре t_1 , α и β — коэффициенты температурной формулы. Введем обозначение $\delta R = \frac{R - R_1}{R}$, тогда

$$\delta R = \alpha(t - t_1) + \beta(t - t_1)^2. \quad (8.3.2)$$

Коэффициенты температурной формулы не дают наглядного представления о ходе температурной зависимости в заданном интервале температур (t_1, t_2) или при заданной температуре t_2 .

Дополнительно вводят ТКС:

1) ТКС в заданном интервале температур, под которым понимают пересчитанное на 1°C относительное изменение сопротивления, вызванное изменением температур от t_1 до t_2 ,

$$\text{TKC}(t_1, t_2) = \frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)} = \alpha + \beta(t_2 - t_1); \quad (8.3.3)$$

2) ТКС при заданной температуре, которая представляет собой производную температурной кривой (8.3.2) в точке t_2 ,

$$\text{TKC}(t_2) = \frac{\partial \delta R}{\partial t} = \alpha + 2\beta(t_2 - t_1). \quad (8.3.4)$$

Измерение коэффициентов температурной формулы и температурных коэффициентов сопротивления можно свести к измерению ТКС в некотором интервале температур. Так как измерения возможны только при температурах выше исходной, то при условии

$$2t_3 - t_1 - t_2 = 0 \quad (8.3.5)$$

получим

$$\begin{aligned} \alpha &= 2 \text{TKC}(t_1, t_3) - \text{TKC}(t_1, t_2), \\ \beta &= \frac{\text{TKC}(t_1, t_2) - \text{TKC}(t_1, t_3)}{t_3 - t_1}. \end{aligned}$$

Для определения ТКС (t_2) измерения проводят при условии

$$2t_2 - t_1 - t_3 = 0, \quad (8.3.6)$$

тогда $\text{TKC}(t_2) = \text{TKC}(t_1, t_3)$.

Таким образом, нахождение любой температурной характеристики микропровода сводится к измерению ТКС в определенном интервале температур. Зачастую первое измерение сопротивления производится

при некоторой начальной температуре t_n , не равной t_0 . В этом случае ТКС подсчитывают по формуле

$$\text{ТКС}(t_n, t_k) = \frac{R_k - R_n}{R_n(t_k - t_n)}, \quad (8.3.7)$$

где t_n и t_k — начальная и конечная температуры отрезка, R_n и R_k — сопротивления отрезка при температурах t_n и t_k соответственно. Для сплавов, как правило, в знаменателе выражения (8.3.7) R_n можно заменить на R_1 . Тогда

$$\text{ТКС}(t_n, t_k) = \alpha + \beta(t_k + t_n - 2t_1). \quad (8.3.8)$$

Для того чтобы ТКС в заданном интервале температур (8.3.3) совпал с ТКС в измеряемом интервале температур (8.3.8), необходимо выполнить условие

$$t_n + t_k = t_1 + t_2 = t_\Sigma = \text{const.} \quad (8.3.9)$$

Например, для $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и $t_2 = 80^\circ\text{C}$ имеем $t_\Sigma = 100^\circ\text{C}$. Если по каким-либо причинам $t_n = 26^\circ\text{C}$, то t_k должно быть 74°C .

Электрический ток нагревает испытываемый отрезок микропровода до температуры t_n или t_k :

$$t_n = t_0 + \Theta_n, \quad t_k = t_0 + \Theta_k, \quad (8.3.10)$$

где Θ_n и Θ_k — начальный и конечный нагрев отрезка провода. Введем связь между начальным и конечным нагревами:

$$\Theta_n = c\Theta_k \quad (c \ll 1). \quad (8.3.11)$$

Учитывая (8.3.9) и (8.3.10), получим необходимый конечный нагрев отрезка

$$\Theta_k = \frac{1}{1+c}(t_\Sigma - 2t_0). \quad (8.3.12)$$

При малом значении коэффициента c для начального нагрева получим

$$t_m \simeq t_0, \quad \lambda_n \simeq \lambda(20^\circ\text{C}).$$

Для конечного нагрева

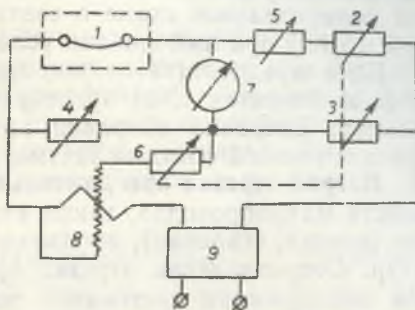
$$t_m \simeq 0,5 t_\Sigma, \quad \lambda_k \simeq \lambda(0,5 t_\Sigma).$$

Для нагрева отрезка требуется мощность

$$\begin{aligned} P_n &= \pi \lambda_n [\text{Nu}]_n l \frac{c}{1+c} (t_\Sigma - 2t_0), \\ P_k &= \pi \lambda_k [\text{Nu}]_k l \frac{1}{1+c} (t_\Sigma - 2t_0). \end{aligned} \quad (8.3.13)$$

Например, для $l=0,14$ м, $c=0,1$, $t_0=17^\circ\text{C}$ и $t_2=100^\circ\text{C}$ получим $\theta_{\text{н}}=6^\circ\text{C}$, $\theta_{\text{к}}=60^\circ\text{C}$, $P_{\text{н}}=27$ мвт и $P_{\text{к}}=330$ мвт. Таким образом, мощность, подводимая к отрезку при измерении ТКС, будет определяться температурой окружающего воздуха t_0 и суммарной температурой t_2 заданного интервала температур.

Испытуемый отрезок микропровода 1 включается в плечо моста (рис. 142). Питание моста осуществляется через регулятор напряжения с выпрямителем 9 . Мощность, выделяемая на отрезке, устанавливается по ваттметру 8 . Токовая обмотка ваттметра включена последовательно в цепь питания моста, отношение плеч которого $k=R_2/R_3$ — величина постоянная. В момент равновесия моста ток питания моста будет в $(1+k)$ раз больше тока, пропускаемого через сопротивление 1 . Обмотка напряжения ваттметра включена параллельно сопротивлению плеча 4 . В момент равновесия моста напряжение на плече 4 будет равно напряжению на сопротивлении 1 .



Р и с. 142. Схема моста—ваттметра для измерения ТКС

Для упрощения установки мощности при разных температурах t_0 и t_2 последовательно с обмоткой напряжения ваттметра включено переменное добавочное сопротивление 6 . Значение сопротивления 6 выбирается в зависимости от t_0 и t_2 таким образом, чтобы показания ваттметра («начальный нагрев» и «конечный нагрев») оставались неизменными для любых температур t_0 и t_2 . Мощность, выделяемая на отрезке провода, при этом соответствует формулам (8.3.13). Уравновешивание моста производится дважды: при начальном нагреве равновесие достигается изменением сопротивления плеча 4 , при конечном — введением (или выведением) сопротивления 5 , представляющего собой небольшую часть сопротивления плеча 2 . Равновесие моста определяется по нулевому показанию гальванометра 7 . Относительное изменение сопротивления отрезка, вызванное изменением его температуры, будет

$$\delta R = \frac{R_{\text{к}} - R_{\text{н}}}{R_{\text{н}}} = \frac{R_5}{R_2}.$$

Для определения ТКС измеренное значение δR следует разделить на разность температур

$$t_{\text{к}} - t_{\text{н}} = \theta_{\text{к}} - \theta_{\text{н}} = \frac{1-c}{1+c}(t_2 - 2t_0). \quad (8.3.14)$$

Для исключения подсчета ТКС при разных температурах t_0 и t_2 сопротивление плеча 2 предварительно, до уравновешивания моста, под-

бирается в зависимости от этих температур таким образом, чтобы отсчетный лимб переключателя сопротивления 5 можно было отградуировать непосредственно в единицах ТКС. При этом одновременно с установкой сопротивления плеча 2 необходимо устанавливать и сопротивление плеча 3, обеспечивая постоянство отношения k сопротивления этих плеч для любых значений t_0 и t_2 . Изменением отношения k , из-за переменного сопротивления R_3 , можно пренебречь.

Таким образом, нагрев отрезка провода, измерение его сопротивления и непосредственный отсчет ТКС обеспечиваются в рассматриваемой измерительной схеме в соответствии с определением ТКС по формуле (8.3.3) при выполнении условия (8.3.9).

Если предполагается широкий диапазон изменения диаметров D , когда изменением $[Nu]$ пренебречь нельзя, можно ввести поправку на диаметр. Введение поправки производится установкой регулируемого шунта к токовой обмотке ваттметра.

Нагрев отрезка при длительных измерениях. Измерение некоторых свойств микропроводов, таких как необратимые изменения сопротивления (усадка, старение), производят при длительных воздействиях температур. Сопротивление отрезка при этом может изменяться до $\pm 30\%$. Для поддержания постоянной температуры отрезка необходимо обеспечить выделение на нем постоянной мощности, независимо от изменения его сопротивления. При этом схема моста в течение всего времени испытания не уравнивается и за показанием ваттметра не наблюдают. Мощность на отрезке (рис. 141) через некоторое время после первоначального уравнивания нагретого отрезка

$$P = \frac{U^2 X}{(X + R)^2} \text{ и } P + \Delta P = \frac{U^2 (X + \Delta X)}{(X + \Delta X + R)^2}, \quad (8.3.15)$$

где ΔP — изменение мощности на отрезке, ΔX — необратимое изменение сопротивления, U — напряжение питания моста. Производная

$$\frac{\partial P}{\partial X} = \frac{U^2 (R - X)}{(X + R)^3} = 0 \text{ при } X = R. \quad (8.3.16)$$

Следовательно, при $X = R$ влияние ΔX на P будет наименьшим. Сопоставляя (8.3.15) и (8.3.16), получим

$$\Delta P = - \frac{P \left(\frac{\Delta X}{X} \right)^2}{4 \left(1 + \frac{\Delta X}{2X} \right)^2}. \quad (8.3.17)$$

При $\frac{\Delta X}{X}$ в пределах $\pm 10\%$ изменение мощности в пределах $0 \div 0,25\%$, при $\frac{\Delta X}{X} = \pm 30\%$ это изменение не более $2,5\%$. Таким образом, этот режим действительно обеспечивает, когда $U = \text{const}$, достаточное по-

стоянство температуры отрезка при изменении его сопротивления в широких пределах.

Измерение ТКС с учетом деформации микропровода. При нагреве изолированного и (или) закрепленного отрезка микропровода возникают термоупругие деформации, вызывающие изменение его электрического сопротивления. Влияние деформации на ТКС микропровода учитывается зависимостью из [10]:

$$\text{TKC} - \text{TKP} \cdot S = \text{TKC}_0 - \text{TKP}_0 \cdot S, \quad (8.3.18)$$

где ТКС и ТКР — температурные коэффициенты сопротивления и расширения микропровода в заданных условиях измерения или эксплуатации; TKC_0 и TKP_0 — температурные коэффициенты сопротивления и расширения свободного микропровода, т. е. микропровода без изоляции и внешнего натяга; S — коэффициент тензочувствительности, который принимается не зависящим от температуры и натяжения. Из (8.3.18) следует

$$(\text{TKC} - \text{TKP} \cdot S)_{\text{изм}} = (\text{TKC} - \text{TKP} \cdot S)_{\text{экс}}, \quad (8.3.19)$$

откуда

$$\Delta \text{TKC} = \text{TKC}_{\text{экс}} - \text{TKC}_{\text{изм}} = (\text{TKP}_{\text{экс}} - \text{TKP}_{\text{изм}}) \cdot S, \quad (8.3.20)$$

где индексы указывают на режимы измерения и эксплуатации, ΔTKC — поправка. Условия закрепления и натяжения, при которых находится микропровод при измерении методом горизонтальной нити, могут не совпадать с условиями эксплуатации микропровода в изделиях. В связи с этим могут не совпадать ТКС микропровода при измерении и эксплуатации. Для исключения такого различия необходимо приблизить условия измерения к условиям эксплуатации и (или) вводить соответствующую поправку ΔTKC . Расчет такой поправки сводится, как следует из (8.3.20), к определению ТКР микропровода в заданных условиях измерения и эксплуатации при известном коэффициенте тензочувствительности. Условия эксплуатации достаточно разнообразны, поэтому рассмотрим некоторые варианты измерения ТКС методом горизонтальной нити.

Измерение ТКС по методике, описанной выше, соответствует измерению ТКС микропровода в изоляции без натяга, с первоначальным провисом ($\epsilon \leq 0$). В этом случае [10]

$$\text{TKP} = \frac{\text{TKP}_ж E_ж + \text{TKP}_и E_и (k^2 - 1)}{E_ж + E_и (k^2 - 1)} = \text{TKP}_м, \quad (8.3.21)$$

где $E_ж$ и $E_и$ — модули упругости жилы и изоляции, $\text{TKP}_ж$ и $\text{TKP}_и$ — температурные коэффициенты расширения материала жилы и изоляции, $k = D/d$ — отношение диаметра микропровода по изоляции к диаметру жилы, $\text{TKP}_м$ — эквивалентный температурный коэффициент расширения микропровода.

Если микропровод до измерения предварительно натянуть на величину $\varepsilon = \varepsilon_0$, то при нагреве этот натяг может быть частично или полностью снят за счет температурного удлинения микропровода ε_0 . В первом случае ТКР равен нулю, во втором — уменьшается на величину ε_0/θ_k . Пусть концы микропровода при измерении раздвигаются (например, за счет смещения одной из контактных стоек) по закону $\varepsilon = \varepsilon_0 + \text{TKP}_c \theta$, где ε_0 — предварительный натяг (или провис), TKP_c — коэффициент пропорциональности. При этом отрезок может не натянуться, частично натянуться или всегда быть натянутым. Значение ТКР микропровода для этих случаев приведены в табл. 1. Выбор того или иного варианта измерения ТКС методом горизонтальной нити определяется условиями эксплуатации микропровода в изделии. Например, если микропровод жестко закреплен на каркасе с температурным коэффициентом расширения TKP_k , то, измерив ТКС при $\varepsilon \leq 0$, необходимо ввести поправку $\Delta \text{TKC} = (\text{TKP}_k - \text{TKP}_m) S$, что неудобно, так как рассчитать TKP_m достаточно сложно. Если измерить ТКС при $\varepsilon \geq \varepsilon_0$, то необходимо ввести поправку $\Delta \text{TKC} = \text{TKP}_k \cdot S$, что значительно проще. Если измерить ТКС при $\varepsilon = \text{TKP}_k \cdot \theta$, то поправку вводить не надо, но сложно выполнить движущуюся стойку и т. п.

Измерение механических величин. Длина испытуемого отрезка микропровода, как указывалось выше, устанавливается обычно в пределах 0,1—0,3 м. При закреплении отрезка на неподвижных испытатель-

Таблица 1

Температурные коэффициенты расширения микропровода при измерениях методом горизонтальной нити

Условия закрепления отрезка			Температурный коэффициент расширения микропровода
Крепление	Первоначальный натяг	Изоляция	
Провисание $\varepsilon = \varepsilon_0 < 0$ Стойки неподвижны	$\varepsilon_0 \leq 0$ $\varepsilon_0 < 0$ $\varepsilon_0 < 0$	$K=1$ $K>1$ $K>10$	$\text{TKP}_ж$ $\text{TKP}_м$ $\sim \text{TKP}_и$
Натяг $\varepsilon = \varepsilon_0 \geq 0$ Стойки неподвижны	$\varepsilon_0 \geq \varepsilon_0$ $0 \leq \varepsilon_0 \leq \varepsilon\theta$	$K \geq 1$ $K=1$	0 $\text{TKP}_ж \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon\theta}\right)$
$\varepsilon_\theta = \text{TKP}_м \theta_k$	$0 \leq \varepsilon_0 \leq \varepsilon\theta$	$K > 1$	$\text{TKP}_м \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon\theta}\right)$
Растягивание $\varepsilon = \varepsilon_0 + \text{TKP}_c \theta$ $\varepsilon_c = \text{TKP}_c \theta_k$ $\text{TKP}_c \geq \text{TKP}_м$ Стойки подвижны	$\varepsilon_0 \geq 0$ $-\varepsilon_c \left(1 - \frac{\text{TKP}_м}{\text{TKP}_c}\right) < \varepsilon_0 \leq 0$ $\varepsilon_0 < -\varepsilon_c \left(1 - \frac{\text{TKP}_м}{\text{TKP}_c}\right)$	$K \geq 1$ $K \geq 1$ $K \geq 1$	TKP_c $\text{TKP}_c \left(1 + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c}\right)$ $\text{TKP}_м$

ных стойках-зажимах погрешность длины зависит от провиса. Если одна или обе стойки перемещаются, провис можно выбрать, но возникает погрешность от неопределенности их начального положения. Удлинение отрезка при исследовании зависимости $\delta L = f(\theta)$ и $\delta R = f(\epsilon)$ измеряется при помощи рычажного индикатора, закрепленного на подвижной стойке. При шкале 1 мм цена деления индикатора 2 мкм и погрешность отсчета удлинения при $l = 200$ мм составит 0,001%. Этой точности достаточно для измерения температурных коэффициентов линейного расширения. При $\theta = 100^\circ\text{C}$, $l = 0,2$ м и индикаторе с отсчетом до 10 мкм погрешность измерения ТКР составит $(0,01/100 \cdot 200) = 5 \times 10^{-7}$ 1/град. При отсчете до 2 мкм — погрешность $1 \cdot 10^{-7}$ 1/град. Для определения момента выбора провиса используют момент начала изменения электрического сопротивления отрезка от появления деформации ϵ_0 . При всех θ деформация ϵ_0 должна оставаться постоянной. Если измеряют $\delta R = f(\epsilon)$ и определяют коэффициент тензочувствительности, то при всех ϵ нагрев θ_0 должен оставаться постоянным. Измерение усилий производят путем укрепления на подвижной стойке отградуированной балочки с тензодатчиком. Обычно усилия, передаваемые от стойки к отрезку, находятся в пределах 0,1—30,0 н. Отсчет до 0,05 н не представляет особых затруднений.

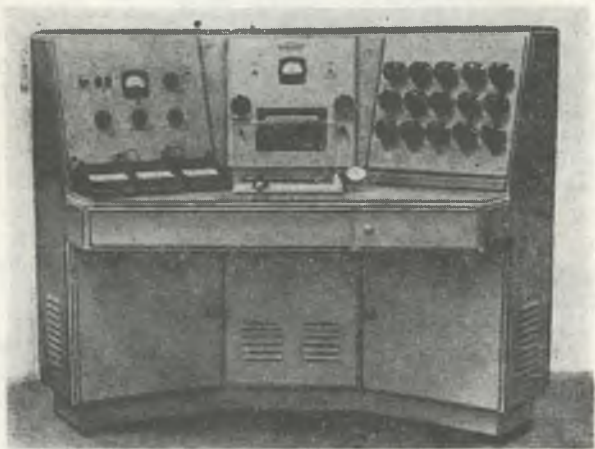
§ 4. Установки по методу горизонтальной нити

В 1961—1971 гг. был разработан и выпущен целый ряд установок для исследования микропроводов по методу горизонтальной нити. Основные параметры некоторых установок приведены в табл. 2. Более подробные данные приведены для двух достаточно характерных установок.

Установка УИМП-3 [8] предназначена для исследования зависимостей $\delta R = f(\theta)$, $\delta L = f(\theta)$ и $\delta R = f(\epsilon)$ для тензометрических микропроводов. Внешний вид установки показан на рис. 143. Технические параметры установки:

1. Измерение сопротивления отрезка микропровода:
 - а) сопротивление отрезка микропровода от 100 до 1000 ом;
 - б) погрешность измерения сопротивления не более 0,5%;
 - в) погрешность ориентировочного измерения омметром не более 20%.
2. Измерение относительного изменения сопротивления отрезка микропровода:
 - а) пределы измерений $\pm 9,9999\%$;
 - б) наименьшая ступень отсчета 0,0001%;
 - в) погрешность измерения не более $\pm (0,001\delta + 0,0001\%)$, где δ — измеряемое относительное изменение сопротивления в процентах.
3. Измерение длины и относительного удлинения отрезка микропровода:

- а) длина отрезка микропровода $240 \div 252$ мм;
- б) предел измерения относительного удлинения не более 5%;
- в) наименьшая ступень отсчета 1 мкм;
- г) погрешность измерения относительного удлинения не более $2 \cdot 10^{-5}$;



Р и с. 143. Установка УИМП-3 для исследования микропроводов

- д) погрешность установки начала удлинения не более $1 \cdot 10^{-6}$;
 - е) погрешность измерения длины отрезка не более 0,2%.
4. Нагрев отрезка микропровода:
- а) пределы нагрева от 30 до 600°C ;
 - б) время нагрева не более 1 секунды;
 - в) погрешность расчета мощности, необходимой для нагрева образца до заданной температуры, не более 3%;
 - г) погрешность установки мощности, необходимой для нагрева образца до заданной температуры, не более 1%;
 - д) нестабильность температуры образца не более 0,5%;
 - е) начальный нагрев образца не более 1°C при начальной мощности $8 \div 10$ мвт;
 - ж) погрешность измерения температуры окружающего воздуха не более 1°C ;
 - з) время выдержки (при включенном реле времени) от 1 до 16 минут;
 - и) погрешность реле времени не более 30 секунд.
5. Питание установки — сеть переменного тока $220 \pm 15\%$, потребляемая мощность — 300 вт.
6. Габаритные размеры установки $1600 \times 1200 \times 800$ мм.
7. Масса установки 250 кг.

Таблица 2

Основные параметры некоторых установок по методу горизонтальной нити

Тип установки	Длина образца, мм	Наибольшая температура, °С	Сопротивление образца, ком	Диаметр образца, мкм	Пределы ТКС, 10 ⁻⁶ град	Дискретность ТКС, 10 ⁻⁶ град	Примечание (дополнительные параметры)
УТКС	0,14	80	0,3—30	6—24	± 10 ¹	5	Отсчет ТКС, коррекции по t_0 через 2°С
УИМП-2	0,10	100 и 200	0,1—23	10—25	± 150	5	Отсчет ТКС, погонного сопротивления, измерение усадки до 600°С, коррекции по t_0 через 2°С
УИМП-3В	0,20	600	10—100	6—20	± 9,9999	0,0001	Отсчет δR , отсчет Δl до 1—10 мкм
УИМП-4	0,20	800	0,1—1,0	20—30	± 9,9999	0,0001	Отсчет δR , программный нагрев, аргон, отсчет Δl до 1—10 мкм
УИМП-5	0,25	250	0,05—1,0	—	± 9,999	0,001	Микроленты, отсчет F через 1 Н, изменение $\delta R = f(\epsilon)$, $\delta L = f(F)$
УИМП-7	0,20	200	0,1—1,0	13—33	± 12—130	1	Коррекция по D через 2 мкм, по t_0 через 2°С
УКТКС-8	0,20	80	0,2—2,4	6—60	± 239,9	0,1	Коррекция по D через 2—5 мкм, по t_0 через 1°С

Установки типа УИМП-3В, УИМП-4, УИМП-5 имеют аналогичный внешний вид.

Установка УИМП-2 [9] предназначена для производственного контроля резистивных микропроводов в стеклянной изоляции. Внешний вид установки приведен на рис. 144.

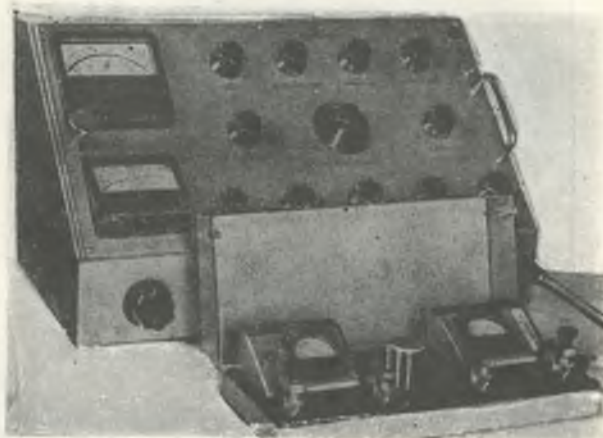


Рис. 144. Установка УИМП-2 для контроля ТКС резистивных микропроводов

Технические данные установки:

1. Измерение общего сопротивления микропровода на бобине:
 - а) пределы измерений от 100 ком до 230 Мом;
 - б) погрешность измерения не более 5%.
2. Измерение погонного сопротивления микропровода:
 - а) пределы измерений от 1 до 230 ком/м;
 - б) погрешность измерения не более 5%;
 - в) погрешность ориентировочного измерения в термостате $\pm 20\%$.
3. Измерение температурного коэффициента сопротивления микропровода:
 - а) интервалы температур измерения 20—100°C и 20—200°C;
 - б) пределы измерения $\pm 10 \cdot 10^{-5}$ 1/град;
 - в) пределы показаний $\pm 15 \cdot 10^{-5}$ 1/град;
 - г) наименьший отсчет $0,5 \cdot 10^{-5}$ 1/град;
 - д) погрешность измерения не более (5% $+ 0,5 \cdot 10^{-5}$ 1/град);
 - е) температура воздуха в термостате 15—35°C;
 - ж) погрешность учета температуры воздуха термостата не более 1°C.
4. Измерение усадки сопротивления микропровода после термообработки.
 - а) температура термообработки 300—600°C;

- б) погрешность установки температуры не более 20°C ;
- в) время термообработки 1—16 минут;
- г) погрешность установки времени термообработки не более 30 секунд;
- д) пределы измерения усадки $\pm 10\%$;
- е) пределы показаний $\pm 15\%$;
- ж) наименьший отсчет 0,05%.



Р и с. 145. Установка УКПМ-8 для измерения ТКС тензорезистивных микропроводов

5. Производительность установки (по пунктам 1—3) не менее 80 бобин. Установка обслуживается одним оператором.

6. Питание установки — стабилизированная сеть переменного тока 220 в $\pm 1,5\%$, потребляемая мощность 50 вт.

7. Габаритные размеры и вес:

- а) габариты установки $65 \times 400 \times 400$ мм;
- б) габариты термостата $400 \times 170 \times 100$ мм;
- в) масса установки с термостатом 50 кг.

Установка типа УИМП-7 выполнена аналогично установке УИМП-2.

Для производственного контроля тензорезистивных микропроводов была разработана установка УКТКМ-8, внешний вид которой приведен на рис. 145, а данные в табл. 2.

Многолетняя эксплуатация показала высокую надежность установок в лабораторных и в производственных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. З. И. Зеликовский, Е. А. Серний. Метод и аппаратура для измерения температурного коэффициента сопротивления микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. 1. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1962, 63—71.

2. З. И. Зеликовский, Е. А. Серний. Устройство для измерения температурного коэффициента сопротивления тонких проводов. Авторское свидетельство СССР, № 165 824, класс 21e, 29/02. Приоритет от 27.III 1962. Опубликовано 26.X 1964. Бюллетень № 20, 40.
3. М. А. Михеев. Основы теплопередачи. М., ГЭИ, 1956.
4. Р. И. Босворт. Процессы теплового переноса. М., Гостехиздат, 1957.
5. J. Langmuir. Convection and conduction of heat in gases. Phys. Rev. vol. XXXIV, 1912, № 6.
6. З. И. Зеликовский, Е. А. Серний. Теплоотдача тонкого горизонтального цилиндра в условиях свободной конвекции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. II. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1964, 89—96.
7. Е. Я. Бадинтер, С. И. Балабан, З. И. Зеликовский, Е. А. Серний. Определение электрофизических свойств тонких проводов из сплавов сопротивления. Вопросы радиоэлектроники, серия XII, вып. XIV, 1966, 89—97.
8. Е. Я. Бадинтер, С. И. Балабан, З. И. Зеликовский. Установка для исследования электрофизических свойств микропроводов. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 103—112.
9. Е. Я. Бадинтер, С. И. Балабан, З. И. Зеликовский. Установка для контроля микропровода. Микропровод и приборы сопротивления, вып. V. Кишинев, «Карта Молдовеняскэ», 1967, 113—117.
10. Е. Я. Бадинтер, С. И. Балабан, З. И. Зеликовский. Температурные характеристики упруго деформированного микропровода в изоляции. Микропровод и приборы сопротивления, вып. IV, 1966, 124—130.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	3
ЛИТЫЕ МИКРОПРОВОДА В СТЕКЛЯННОЙ ИЗОЛЯЦИИ	6
ГЛАВА I. Основы литья микропровода в стеклянной изоляции	6
§ 1. Общие сведения	6
§ 2. Физико-химические превращения микрованны в процессе литья микропровода	9
§ 3. Предельные возможности капельного способа литья микропровода	25
Литература	33
ГЛАВА II. Электромагнитные и магнитогидродинамические явления в системе индуктор—капля	35
§ 1. Электродинамическое взаимодействие в системе индуктор—капля	36
§ 2. Критическая масса при литье микропровода	40
§ 3. Экспериментальные исследования системы индуктор—капля	50
§ 4. О форме капли в условиях литья	57
§ 5. Механика формирования микропровода	63
§ 6. Колебания капли в процессе литья	66
Литература	77
ГЛАВА III. Термические основы формирования микропровода	79
§ 1. Нагрев капли при литье микропровода	80
§ 2. Квазистационарная кристаллизация микропровода в однородной среде	84
§ 3. Кристаллизация микропровода в неоднородной среде	102
§ 4. Кристаллизация в условиях переменной внешней температуры	115
§ 5. Кристаллизация при переменном сечении жидкой фазы микропровода	120
§ 6. Разрывы при микролитье в капилляр	127
§ 7. Переходные режимы и обрыв процесса	130
Литература	133
ГЛАВА IV. Оборудование и промышленное производство микропровода в стеклянной изоляции	135
§ 1. Технологическое оборудование участков литья микропровода в стеклянной изоляции	135
§ 2. Технологические режимы литья микропровода	159
§ 3. Исходные материалы для литья микропровода	170
§ 4. Применение статистических методов к анализу процесса литья микропровода	177

§ 5. Нормирование труда и организация производства литого микропровода	185
Литература	192

СВОЙСТВА ЛИТЫХ МИКРОПРОВОДОВ В СТЕКЛЯННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

ГЛАВА V. Механические свойства микропровода	197
§ 1. Геометрические параметры микропровода	197
§ 2. Разрывная прочность микропровода	202
§ 3. Прочность микропровода при изгибе	215
§ 4. Кручение микропровода	223
§ 5. Температурный коэффициент расширения микропровода	224
§ 6. Тензочувствительность микропровода	226
§ 7. Коэффициент трения микропровода	228
§ 8. Характер спая между стеклом и металлом в микропроводах	228
Литература	230
ГЛАВА VI. Электрические свойства микропровода	234
§ 1. Удельное и погонное сопротивление	234
§ 2. Температурный коэффициент сопротивления	238
§ 3. Термоэлектродвижущая сила	243
§ 4. Электрическая прочность стеклянной изоляции	244
§ 5. Электрическое сопротивление, диэлектрические потери и проницаемость стеклоизоляции	249
§ 6. Временная стабильность свойств микропровода	252
§ 7. Токи плавления микропроводов	265
Литература	272
ГЛАВА VII. Методы и аппаратура для исследования свойств микропровода	276
§ 1. Определение геометрических размеров микропровода	276
§ 2. Измерение механической прочности микропровода	278
§ 3. Измерение погонного и удельного сопротивления, общего сопротивления, ТКС и ТЭДС микропровода	285
§ 4. Измерение электрических свойств изоляции	286
§ 5. Методы исследования химического состава микропровода	290
§ 6. Методы исследования структуры микропровода	291
Литература	293
ГЛАВА VIII. Метод горизонтальной нити	296
§ 1. Принцип метода	296
§ 2. Тепловой режим	297
§ 3. Измерительные схемы	303
§ 4. Установки по методу горизонтальной нити	311
Литература	316

КИШИНЕВСКИЙ МАГАЗИН «АКАДЕМКНИГА»
ВЫСЫЛАЕТ НАЛОЖЕННЫМ ПЛАТЕЖОМ:

1. СВЯЗАННЫЕ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И МЕТАЛЛАХ. 1966 г. Цена 42 коп.
2. Г. В. Чалый и др. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ. 1968 г. Цена 1 р. 12 к.
3. ЧАСТОТА ПРОМЫШЛЕННОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ПРОБЛЕМЫ ЕЕ ОПТИМИЗАЦИИ. 1969 г. Цена 88 коп.
4. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. 1970 г. Цена 88 коп.
5. ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. 1970 г. Цена 78 коп.

Заказы на книги необходимо направлять по адресу: 277612, Кишинев, пр. Ленина, 1, издательство «Штиинца».

**Е. Я. Бадинтер, Н. Р. Берман, И. Ф. Драбенко,
В. И. Заборовский, З. И. Зеликовский, В. Г. Чебан**

ЛИТОЙ МИКРОПРОВОД И ЕГО СВОЙСТВА

Редактор С. Зюльковская. Корректор Н. Яновер. Художник И. Нефашев
Художественный редактор В. Чупин. Технические редакторы Н. Попеску,
А. Киселице

Сдано в набор 17.VIII 1972 г. Подписано к печати 20.III 1973 г. АБ04786. Формат 70×90¹/₁₆.
Печ. л. 20,0+2 вкл. Усл.-печ. л. 23,69. Уч.-изд. л. 23,28. Тираж 2800. Цена 2 р. 68 к. Заказ 761.
Издательство «Штиинца», Кишинев, 277612, пр. Ленина, 1

Типография издательства «Штиинца», ул. Берзарина, 10