

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Технологический институт
Федерального государственного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Южный федеральный университет»**

С.П. Малюков

**ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ
ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ С ВЫСОКОПЛОТНОЙ
ЗАПИСЬЮ ИНФОРМАЦИИ**

**Ростов-на-Дону
Издательство Южного федерального университета
2009**

УДК 621.38

ББК 32.85

М 18

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры
конструирования электронных средств
Таганрогского технологического института
Южного федерального университета *Рындин Е. А.*;
доктор физико-математических наук, профессор кафедры
теоретической физики Таганрогского государственного
педагогического института *Жорник А. И.*

*Монография подготовлена и издана в рамках
национального проекта «Образование»
по «Программе развития федерального государственного
образовательного учреждения «Южный федеральный
университет» на 2007–2010 гг.»*

Малюков С.П.

М18 Физико-технологические основы создания электронных устройств с высокоплотной записью информации: монография / С. П. Малюков. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. – 168 с.: ил. 57.
ISBN 978-5-9275-0668-2

В книге рассмотрены современные физико-технологические основы создания электронных устройств с высокоплотной записью информации.

Предназначена для научных работников, преподавателей вузов, аспирантов, магистрантов, занимающихся конструированием и технологией устройств накопления информации.

ISBN 978-5-9275-0668-2

УДК 621.38

ББК 32.85

© ТТИ ЮФУ, 2009
© С.П. Малюков, 2009
© Южный федеральный
университет, 2009

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ С ВЫСОКОПЛОТНОЙ ЗАПИСЬЮ ИНФОРМАЦИИ

1.1. Современное состояние элементов магнитной записи и материалов, используемых в их производстве

Ускоренное развитие управляющих комплексов аппаратуры, в которой используются большие объемы информации, определяет постоянное возрастание технических требований к системам накопления информации (СНИ) по функциональной сложности, быстродействию, информативности, ресурсу работы и надежности при усложнении условий эксплуатации. Кроме того, увеличение функциональной сложности комплексов не должно входить в противоречие с существующими тенденциями по улучшению видовых, габаритных и энергетических характеристик аппаратуры.

В настоящее время наиболее полно этим требованиям отвечают системы накопления информации на основе запоминающих устройств магнитной записи с движущимся носителем. Свойства устройств магнитной записи (УМЗ) – хранение большого количества информации в малом объеме при малом расходе мощности на единицу информации и постоянная тенденция к снижению стоимости хранения единицы информации при увеличении емкости – ставит их вне конкуренции по сравнению с другими типами запоминающих устройств (ЗУ).

Первый накопитель информации (IBM-350), включающий магнитный диск и подвижную магнитную головку, появился в 1957 г. Данный накопитель применялся в качестве внешней памяти вычислительных машин. Очевидно, что накопитель на магнитных дисках постоянно совершенствуется. Это включает решение комплекса физикотехнических проблем, связанных не только с улучшением конструктивных, но и магнитных, а также механических параметров и носителя, и магнитной головки [1 – 5].

Тенденция роста поверхностной информационной плотности D_s записи для накопителей на магнитных дисках составляет более 10^6 бит/мм². При достижении такой сравнительно высокой плотности определяющую роль играют технические средства, основанные на перпендикулярной и магнитооптической записи, а также на магниторезистивном воспроизведении.

Характерные данные, отражающие специфику технических средств, соответствующих магнитным накопителям на магнитных дисках с заданной поверхностной информационной плотностью записи, представлены в табл. 1.1.

В течение длительного периода развития магнитных накопителей на подвижном носителе сравнительно неплохие характеристики записи-воспроизведения обеспечивали магнитные головки (МГ) с массивным (обычно ферритовым) сердечником. Однако геометрические параметры данных головок, их высокая индуктивность и другие факторы стали сдерживать увеличение информационной плотности и скорости передачи данных. В последнее время в лучших накопителях информации ис-

пользуются тонкопленочные магнитные и магниторезистивные головки разных модификаций. Современные накопители, основанные на перпендикулярной магнитной записи, содержат однополюсные магнитные головки, рабочий элемент которых в виде основного полюса выполнен из высокопроницаемого тонкопленочного материала.

Таблица 1.

Сравнительные характеристики магнитных накопителей

D , бит/мм ²	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷			
Вид носителя	Фиксированный диск	Съемный пакет		Фиксированный модуль	Диск в корпусе		Съемный диск			
d_0 , мм	610	356								
					265-200					
					135					
		94								
						65				
							45 и менее			
h_0 , мкм	16,0	3,0	2,0	1,0	0,45	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02
Рабочий слой носителя	Порошковый	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Co}\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$							
					Тонкопленочный					
							С перпендикулярным намагничиванием			
Магнитная головка	С многослойным сердечником		Ферритовая NiZn		Монолитная МИГ MnZn					
					Тонкопленочная		Однополосная			
							Магниторезистивная			
v_0 , бит/с	2·10 ⁴	7·10 ⁴	3·10 ⁵	8·10 ⁵	1,2·10 ⁵	1,8·10 ⁵	3·10 ⁶	4,5·10 ⁶	6·10 ⁶	

Здесь d_0 – диаметр диска, h – расстояние от головки до носителя, v_0 – скорость передачи данных, МИГ – магнитная головка с «металлическим» заполнением рабочего зазора.

Повышение плотности записи информации сопряжено с уменьшением каждого из параметров, а именно: расстояния между дорожками, линейного размера бита информации (длины перехода намагниченности), величины рабочего зазора магнитной головки, толщины рабочего слоя носителя соответственно для продольной записи и для перпендикулярной записи расстояния между головкой и носителем.

Существенное увеличение информационной плотности обеспечивает перпендикулярная магнитная запись. С уменьшением расстояния между головкой и носителем преимущества перпендикулярной записи (по сравнению с продольной) становятся очевидными, что наглядно подтверждается зависимостью уровня сигнала воспроизведения E от расстояния между головкой и носителем h (рис. 1.1,а) и функциональной зависимостью $D = f(h)$ (рис. 1.1,б) для продольной (кривая 1) и перпендикулярной (кривая 2) записи [6].

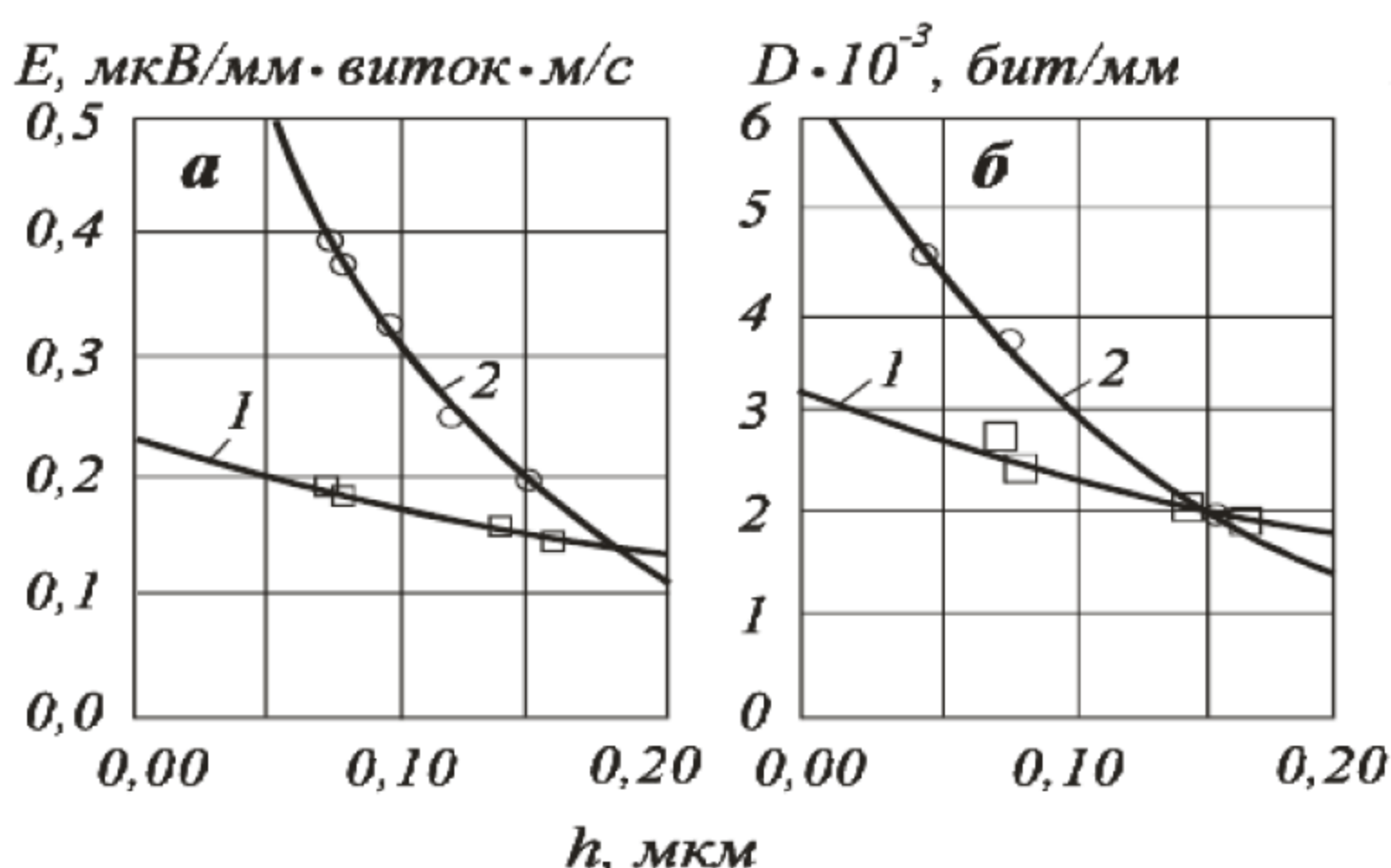


Рис. 1.1. Характеристики записи-воспроизведения

Динамика роста накопленных знаний о конструктивных возможностях магнитных головок показывает, что для магнитной записи наступил этап активного применения современных технологий с использованием новых конструктивных материалов.

1.2. Тонкопленочные магнитные головки

Сравнительно неплохие характеристики имеют магнитные головки с металлическим заполнением зазора, так называемые MIG-головки. Но все же наиболее перспективны магнитные головки с тонкопленочными элементами – однополюсные, предназначенные для носителей с перпендикулярным намагничиванием.

Тонкопленочные магнитные головки с вертикальной конфигурацией

Современная технология позволяет изготавливать тонкопленочные магнитные головки (ТМГ) с относительно толстым магнитопроводом. Предложенный [7] способ изготовления ТМГ для видеосистемы, включающий операции модифицированного ионно-плазменного напыления, ионно-плазменного травления и механической обработки, дает возможность сформировать магнитные, электропроводящие и диэлектрические элементы на базе тонкопленочной технологии. Толщина магнитопровода, изготовленного данным способом ТМГ, составляет 25 мкм. Такая относительно большая толщина магнитопровода необходима для исключения его магнитного насыщения. Магнитопровод формируется из кобальт-ниобий-циркониевого материала с магнитной индукцией насыщения 0,9 Тл. Тонкопленочные полюсные наконечники имеют закругленную фор-

му, что обеспечивает оптимальное распределение магнитного потока в области их торцевых поверхностей. По своей структуре рассматриваемая ТМГ является вертикальной с двухуровневой тонкопленочной электропроводящей обмоткой с плоскими спиральными витками, расположенными в двух параллельных плоскостях между нижней и верхней частями магнитопровода. Намотанная из меди обмотка состоит из 15 витков. В качестве изолирующего материала используется двуокись кремния. Уровень сигнала воспроизведения при записи с помощью данной головки гораздо выше, чем при записи с помощью ферритовой головки вплоть до 11 МГц.

Наряду с повышением информационной плотности записи существенно возросла и скорость передачи данных: в первых модулях накопителей она составляла около $2 \cdot 10^4$ бит/с, а в современных накопителях – примерно на 2 порядка выше.

Широкое распространение получили ТМГ с одноуровневой многовитковой обмоткой. Характерная конструкция такого типа головок изображена на рис. 1.2,а (для упрощения показаны только внутренние и внешние витки обмотки).

Однако в последнее время разработчики ТМГ проявляют больший интерес к совершенствованию конструкции МГ с двухуровневой многовитковой обмоткой (рис. 1.2,б). Увеличение числа витков – один из эффективных путей повышения уровня сигнала воспроизведения и отношения сигнал/шум для небольшой ширины дорожки и сравнительно небольшой скорости движения носителя. В то же время число витков ограничивается технологическими возможностями.

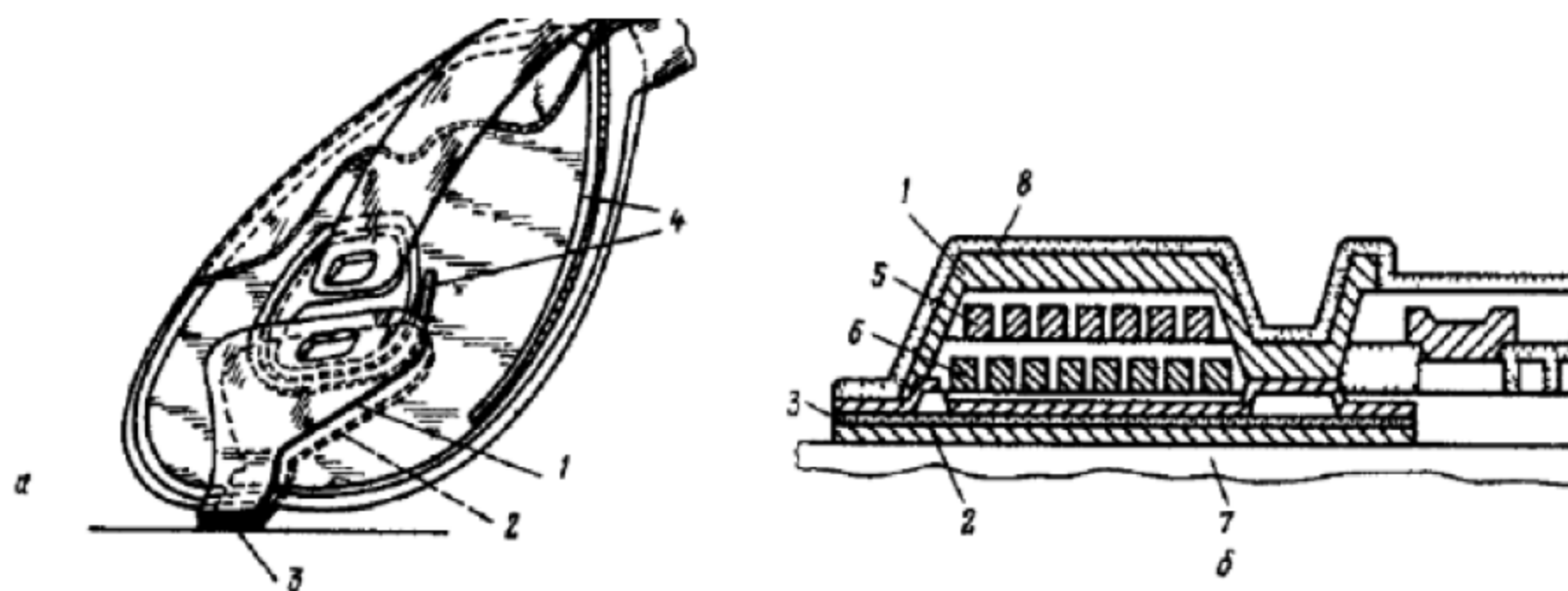


Рис. 1.2. Тонкопленочные магнитные головки с одноуровневой (а) и двухуровневой (б) электропроводящими обмотками:

1 – верхняя часть магнитопровода, 2 – нижняя часть магнитопровода, 3 – рабочий зазор, 4 – тонкопленочные витки одноуровневой обмотки, 5 – витки верхнего уровня обмотки, 6 – витки нижнего уровня обмотки, 7 – подложка, 8 – защитное покрытие

Современная комбинированная технология, включающая напыление и электроосаждение, позволяет изготавливать ТМГ с двухуровневой 48-витковой обмоткой, т.е. с обмоткой, содержащей относительно большое число витков [8]. Обмотка такой головки формировалась из меди электроосаждением через прецизионную резистивную маску, выполненную при помощи ионного реактивного травления. Данная головка имеет вертикальную конфигурацию с симметричными полюсными наконечниками толщиной 3 мкм, выполненными из пермаллоя, с величиной рабочего зазора 0,4 мкм и шириной полюсных наконечников 6,5 мкм. С помощью такой головки удалось реализовать продольную плотность записи около 2165 бит/мм при поперечной плотности, приблизительно равной 110 дорожек/мм; отношение сигнал/шум при этом примерно на 3 дБ больше, чем для аналогичной 31-витковой тонкопленочной головки. В

качестве носителя использовался магнитный диск, имеющий многослойное С/Co-Ni-Cr/Cr-покрытие с коэрцитивной силой 112 кА/м. Относительная скорость движения носителя составляет 8,67 м/с, высота плавления МГ – 0,15 мкм, амплитуда тока записи – 20 мА.

В [8] описаны структура и технологический процесс изготовления ТМГ, предназначенной для записи с перпендикулярным намагничиванием рабочего слоя носителя в виде жесткого диска с поверхностной плотностью 16 Мбит/см². Данная головка содержит двухуровневую электропроводящую 31-витковую обмотку и может выполнять функцию не только записи, но и воспроизведения информации. Ширина полюсных наконечников равна 12,5 и 10 мкм, толщина их – не более 1 мкм, величина рабочего зазора равна 0,2 мкм. Изготовление такой головки базируется на технологических процессах, включающих последовательные операции маскирования, осаждения, фотолитографии и т. п. При этом для тонкопленочного магнитопровода предлагается использовать пермаллой с 82 %-ным содержанием никеля, а для электропроводящей обмотки – медь или алюминий.

Предлагается [7] подход к изготовлению ТМГ, выполненной в виде плавающего элемента. Конструкция данной головки по компоновке ее составных элементов относится к конструкции горизонтального типа: ее верхний и нижний магнитопроводы расположены параллельно плоскости носителя. В то же время внешне она похожа на МГ вертикальной конфигурации. В выступающей части нижнего магнитопровода имеется рабочий зазор, предназначенный для записи информации. В этом же магнитопроводе может быть выполнен и рабочий зазор, над которым расположены тонкопленочные магниторе-

зистивные элементы для воспроизведения информации. Рабочие зазоры величиной не более 0,25 мкм формируются электронно-лучевым и реактивным ионным травлением. Следует отметить, что ТМГ горизонтальной конфигурации изготавливались на ранней стадии развития тонкопленочной технологии МГ. С того времени достигнут определенный прогресс в литографии, в напылении износостойких пленок, освоены новые технологические процессы ионного реактивного травления и т.п. Все это послужило базой для технологической реализации ТМГ горизонтальной конфигурации с относительно высокими техническими характеристиками.

ТМГ, имеющие положительную магнитострикцию верхней части магнитопровода и отрицательную нижней, обладают лучшей, чем обычные тонкопленочные головки, характеристикой записи-воспроизведения. Это результат более высокой магнитной проницаемости магнитопровода, что обусловлено магнитоупругой анизотропией, вызванной внутренними напряжениями, возникающими в пермалловых пленках, из которых изготавливается магнитопровод [8]. Роль такой наведенной магнитной анизотропии оценивалась по измеренной индуктивности ТМГ при разных значениях магнитодвижущей силы.

При расширении магнитопровода с удалением от рабочей поверхности ТМГ увеличивается их чувствительность. С помощью магнитооптического метода установлено, что с увеличением угла расширения уменьшается поле анизотропии. Это можно объяснить перераспределением упругих внутренних напряжений вдоль оси «трудного» намагничивания: теоретические результаты, получен-

ные на основании модели, предполагающей существование упругих напряжений, согласуются с экспериментальными.

1.3. Комбинированные магнитные головки

С помощью комбинированной магнитной головки (КМГ), состоящей из элементов ТМГ для записи и элементов магниторезистивной головки для воспроизведения, достигнута продольная плотность записи около 6220 бит/мм при поперечной плотности, составляющей примерно 250 дорожек/мм [6]. В качестве носителя использовался магнитный диск, имеющий Co-Pt-Cr-тонкопленочное покрытие с высокой коэрцитивной силой (144 кА/м) и большим коэффициентом прямоугольности петли гистерезиса, равным 0,8. Для реализации такой высокой плотности записи размеры элементов ТМГ и величина рабочего зазора выбирались оптимальными с точки зрения получения большого поля рассеяния и высокой разрешающей способности при записи. При изготовлении элементов принимались во внимание их оптимальные параметры для достижения высокого уровня сигнала воспроизведения при высокой разрешающей способности. Ширина полюсных наконечников для записи составляет 2,5 мкм, толщина – 4 мкм, величина рабочего зазора – 0,4 мкм, амплитуда тока записи около 50 мА, число витков ТМГ – 8. Для воспроизведения использовался магниторезистивный экранированный элемент шириной 2 мкм и высотой 1 мкм. Рабочий зазор для воспроизведения 0,25 мкм. Задающий ток 5...7 мА. Линеаризация магниторезистивной характеристики обеспечивалась с помощью смещающего элемента из магнитомягкого материала, а магнитные свойства стабилизировались в ре-

зультате применения магнитного смещения обменным взаимодействием. Рассматриваемая КМГ (рис. 1.3) при вполне приемлемом отношении сигнал/шум характеризуется высоким уровнем сигнала воспроизведения.

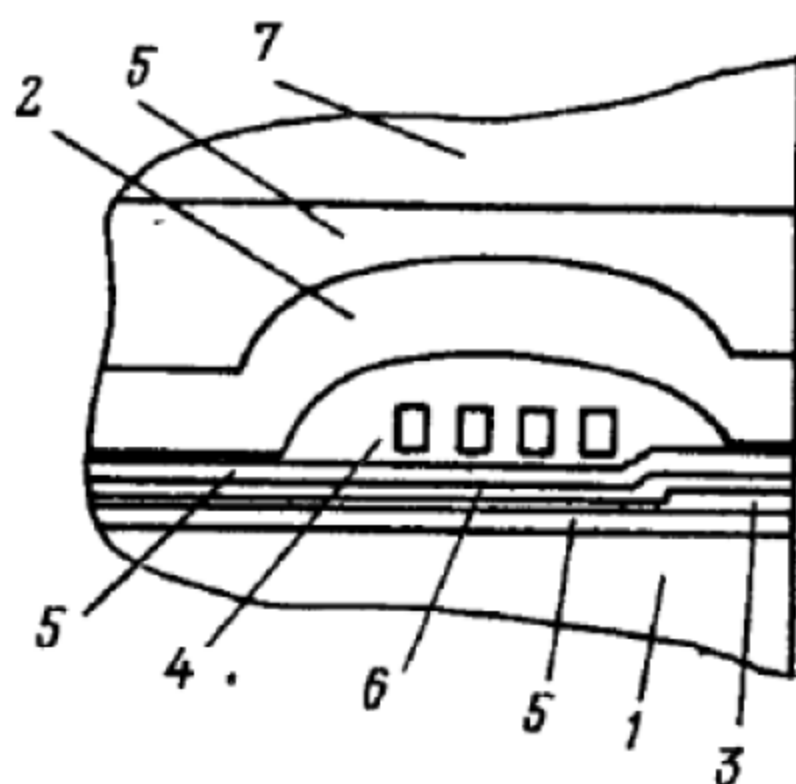


Рис. 1.3. Комбинированная магнитная головка записи-воспроизведения:

- 1 – ферритовая подложка, 2 – верхний тонкопленочный магнитопровод,
- 3 – магниторезистивный элемент, 4 – электропроводящая обмотка,
- 5 – диэлектрические слои, 6 – электропроводящий слой, 7 – керамическая пластина

Сравнительно высокие показатели записи-воспроизведения продемонстрированы [9] на примере лабораторного образца тонкопленочного накопителя, включающего тонкопленочный Co-Pt-Cr-носитель с коэрцитивной силой около 10^7 кА/м, запись и воспроизведение на котором осуществляли с помощью КМГ с тонкопленочными элементами для записи и магниторезистивными элементами для воспроизведения. По своей структуре МГ воспроизведения относится к тому же типу, который описан в [10]. Ширина магниторезистивного

элемента равна 3,6 мкм, а величина рабочего зазора – 0,4 мкм. В данном накопителе реализована продольная плотность записи около 4000 бит/мм и поперечная плотность примерно 200 дорожек/мм при высоте плавания МГ 64 нм.

Достигнутая независимо друг от друга разными авторами [9,10] сравнительно высокая поверхностная плотность записи информации в магнитном накопителе на тонкопленочном носителе и тонкопленочной магнитной и магниторезистивной головках свидетельствует о том, что с развитием тонкопленочной технологии постепенно реализуются большие потенциальные возможности тонкопленочных средств записи-воспроизведения.

Более детальное исследование экспериментальных результатов записи-воспроизведения и анализ частоты следования ошибок и наложения сигналов подтверждают реальную возможность получить с помощью тонкопленочных средств высокую информационную плотность, составляющую около 1,6 Мбит/мм².

В предлагаемой [11] конструкции КТМГ с магниторезистивным элементом, расположенным в рабочем зазоре, составные тонкопленочные элементы сформированы на ферритовой подложке, обмотка записи данной головки содержит 4 витка. Из экспериментальной характеристики записи-воспроизведения следует, что максимальный уровень сигнала воспроизведения достигается при токе записи, равном около 65 мА. Экспериментальные данные, характеризующие уровни шума и перезаписи, а также искажения, свидетельствуют о том, что с помощью рассматриваемой КМГ на гибком диске сравнительно небольшого

диаметра можно реализовать запись информации с относительно высокой продольной плотностью около 1200 бит/мм.

1.4. Магниторезистивные головки

В настоящее время существует 2 типа тонкопленочных магнитных головок: тонкопленочные магнитоиндуктивные (ТМИГ) и тонкопленочные магниторезистивные (ТМРГ) [6]. ТМИГ, как и обычные дискретные магнитоиндуктивные головки (ДМИГ), могут работать как в режиме записи, так и в режиме воспроизведения, а ТМРГ – только в режиме воспроизведения. Однако при работе в режиме воспроизведения ТМИГ имеют ряд недостатков:

- сильная зависимость амплитуды выходного сигнала от скорости движения носителя магнитной записи (НМЗ) и расстояния "головка – носитель";

- низкая чувствительность, значительно затрудняющая их использование для воспроизведения информации, записанной на ленточных НМЗ;

- высокий уровень шумов и т.п.

ТМРГ лишены этих недостатков, кроме того, им присущи независимость амплитуды выходного сигнала от скорости движения НМЗ, высокая надежность работы и простота конструкции.

Первая конструкция ТМРГ была предложена еще в 1966 году [12], но ввиду несовершенства технологии тех лет ее практическая реализация была осуществлена лишь в начале 70-х годов. С тех пор

работы по созданию ТМРГ ведутся практически во всех промышленно развитых странах мира.

В отличие от объемных ферромагнитных образцов тонкие магнитные пленки (ТМП) характеризуются ярко выраженной магнитной анизотропией. Это связано с тем, что они осаждаются на подложки, нагретые до температуры 473 – 573 К, в присутствии постоянного магнитного поля напряженностью 4000 – 8000 А/м [13]. В результате в пленке формируется ось легкого намагничивания (ОЛН), параллельная приложенному магнитному полю, вдоль которой при отсутствии этого поля ориентируется вектор \overline{M} . Кроме того, ярко выраженная магнитная анизотропия ТМП обусловлена малой толщиной последних, т.е. высокой анизотропией формы, обеспечивающей ориентацию вектора \overline{M} в плоскости пленки.

Основные особенности магниторезистивного эффекта в ТМП связаны с влиянием толщины пленки на электрические свойства. Известно, что удельное электрическое сопротивление тонких пленок увеличивается с уменьшением толщины. Это явление обусловлено рассеянием свободных электронов на поверхностных дефектах и называется размерным эффектом. Удельное электрическое сопротивление пленки начинает заметно увеличиваться с того момента, когда длина свободного пробега электронов l_0 становится сравнимой с толщиной пленки t . Значение величины l_0 для состава пермаллоя $Ni_{85}Fe_{15}$ было определено в работе [14]:

$$l_0 = \frac{3 \cdot 10^{-11}}{\rho_0} \text{ [см]}. \quad (1.1)$$

Так как значение l_0 сплава $\text{Ni}_{85}\text{Fe}_{15}$ мало отличается от величины этого же параметра для немагнитных материалов, представляется возможным использовать его и для сплавов с несколько отличающимися составами.

Кроме параметра l_0 , при исследовании резистивных свойств ТМП важно знать минимальное значение толщины пленки t_{\min} , при котором она является сплошной, т.е. электрически и магнитно непрерывной, а также максимальное t_{\max} , при котором удельное электрическое сопротивление пленки перестает зависеть от толщины, т.е. практически равно значению максимальной толщины объемных образцов. Для пермалловых пленок $t_{\min} = 20$ нм, а $t_{\max} = 100$ нм. По этой причине подавляющее число магниторезистивных элементов (МРЭ) имеют толщину от 20 до 100 нм [15].

Кроме рассеяния на поверхностных дефектах, на величину ТМП существенное влияние оказывает их кристаллическая структура. Это связано с рассеянием свободных электронов на границах зерен отдельных кристаллов. Кристаллическая структура пленки может быть изменена с помощью термического отжига. Результатом отжига является увеличение размеров кристаллитов и сокращение их количества, а значит, уменьшение площади границ зерен. Как и следовало ожидать, измерения удельного электрического сопротивления показали, что увеличение размеров зерен пленки сопровождается уменьшением ее ρ_0 и

ростом $\frac{\Delta\rho_{\max}}{\rho_0}$ [16]. Степень уменьшения ρ_0 в процессе отжига про-

порциональна температуре и времени термической обработки. Для получения ТМП с высокими магниторезистивными свойствами температура отжига не должна превышать 598 К, при этом оптимальной является температура 523 К. Увеличение температуры отжига выше 598 К сопровождается значительным снижением ρ_0 , понижением коэрцитивности и дисперсии магнитной анизотропии ТМП [17], что значительно уменьшает чувствительность изготавливаемых из этих пленок МРЭ. Кроме того, термический отжиг ТМП при температуре выше 598 К сопровождается снижением анизотропии сопротивления $\Delta\rho_{\max}$ [17], что крайне нежелательно.

На электрофизические параметры ТМП существенное влияние оказывают внутренние напряжения. Они обусловлены, главным образом, тем, что пленки осаждаются на горячие подложки. При охлаждении до комнатной температуры в таких пленках возникают остаточные напряжения двух видов. Одним из них являются термические напряжения, вызванные различием в значениях коэффициентов термического расширения материалов пленки и подложки. Вторым видом являются внутренние напряжения в самой пленке, существующие между серединой и поверхностью отдельных кристаллитов. Если материал ТМП обладает свойством магнитострикции, остаточные напряжения вызывают изменение магнитных свойств. Прежде всего это касается значений коэрцитивной силы H_C и магнитной анизотропии H_K и незначительно – значений $\Delta\rho_{\max}$ и ρ_0 [17]. Именно с внутренни-

ми напряжениями и ненулевой магнитострикцией связывают расхож-

дение значений $\frac{\Delta\rho_{\max}}{\rho_0}$ в объемных и тонкопленочных образцах

[17].

Магниторезистивные Ni-Fe-сплавы в отличие от аналогичных сплавов Ni-Co характеризуются практически нулевой магнитострикцией, а также более низкой коэрцитивностью.

Для получения ТМП с хорошими магнитными и электрическими параметрами важное значение имеют свойства подложек: коэффициент термического расширения, теплопроводность и шероховатость. При выборе подложки важно, чтобы коэффициенты термического расширения подложки и пленки были близкими по величине. Это будет способствовать снижению внутренних напряжений в ТМП. Ввиду того, что МРЭ имеют сопротивление от 10 до 1000 Ом и работают при очень больших плотностях тока, достигающих 10^{10} А/м², очень важно, чтобы материал подложки имел минимальную шероховатость для получения сплошных ТМП толщиной порядка 20 нм, так как чувствительность МРЭ обратно пропорциональна толщине пленки [18]. В наибольшей степени всем этим требованиям удовлетворяют окисленные кремниевые подложки.

С конструктивной точки зрения все ТМРГ делятся на горизонтальные и вертикальные. В головках горизонтальной конструкции плоскость МРЭ параллельна плоскости НМЗ, а у вертикальных – перпендикулярна (рис. 1.4). Как в горизонтальных, так и в вертикальных ТМРГ сигнальное магнитное поле действует вдоль оси «трудного» намагничивания (ОТН МРЭ), поэтому процесс перемагничивания по-

следнего определяется в основном когерентным вращением вектора \overline{M} .

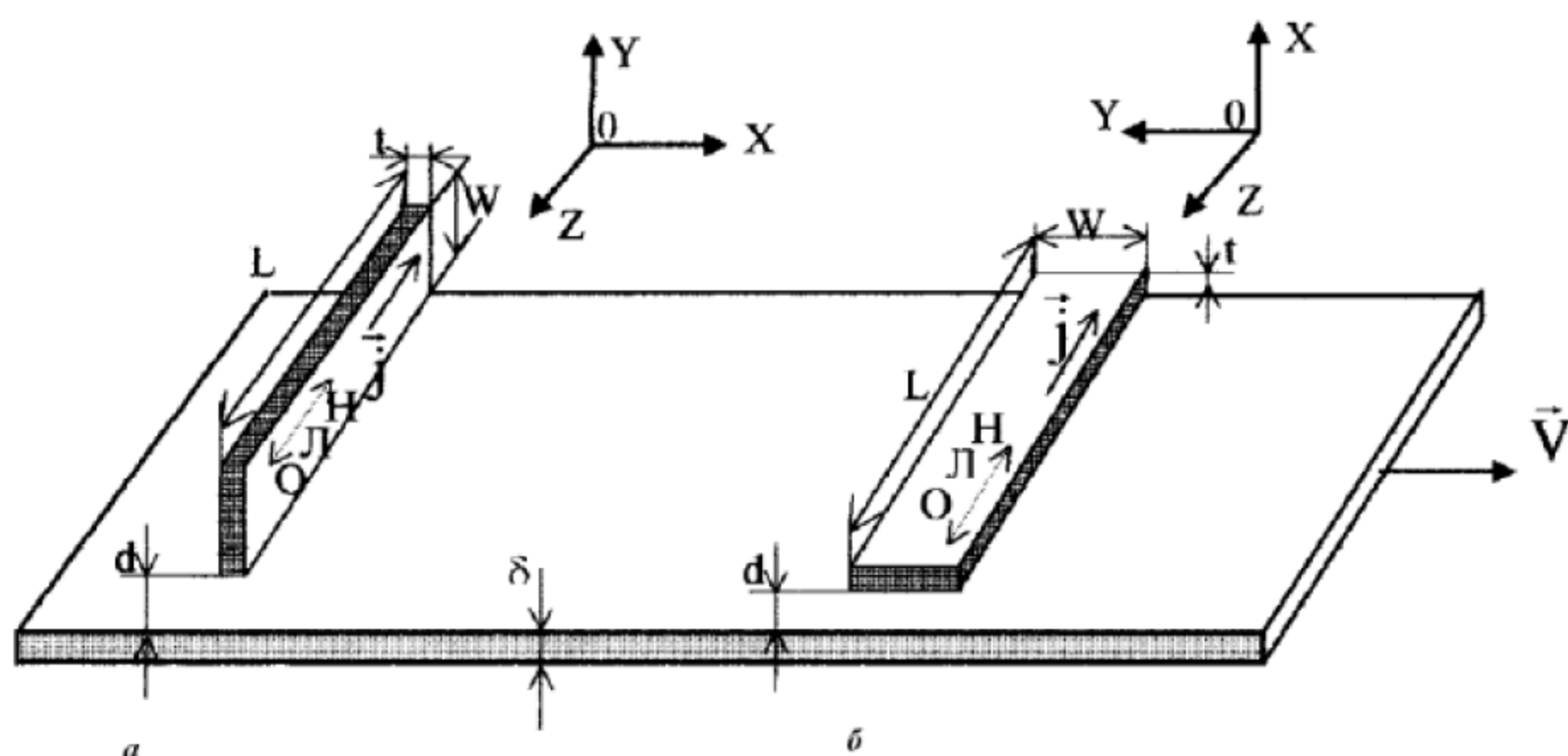


Рис. 1.4. Вертикальная (а) и горизонтальная (б) конструкция ТМРГ:
1 – МРЭ; 2 – НМЗ; W – ширина МРЭ; t – толщина;
ОЛН – ось легкого намагничивания; ОТН – ось трудного намагничивания

Первая и до недавнего времени единственная конструкция горизонтальной ТМРГ (рис. 1.5) была предложена авторами [12]. Ее МРЭ был изготовлен из пленки пермаллоя толщиной 60 нм, напыленной в вакууме на стеклянную подложку. Ширина МРЭ была равна 25 мкм, ток детектирования $I = 10$ мА, $\rho_0 = 1,7$ кОм, а $\Delta\rho_{\max}/\rho_0 = 2,2$ %. Поле смещения создавалось с помощью электромагнита, расположенного под стеклянной подложкой с нанесенным на нее МРЭ. Данная конструкция не получила практического применения, хотя ее чувствительность выше, чем у аналогичных вертикальных ТМРГ.

Причиной этого является ряд существенных недостатков, присущих горизонтальным ТМРГ:

а) очень низкая надежность работы, связанная с сильным абразивным воздействием НМЗ на МРЭ. Применение специальных защитных покрытий значительно снижает чувствительность головки и усложняет процесс ее изготовления;

б) низкая разрешающая способность и наличие паразитной интерференции сигналов, связанные с достаточно большой шириной МРЭ.

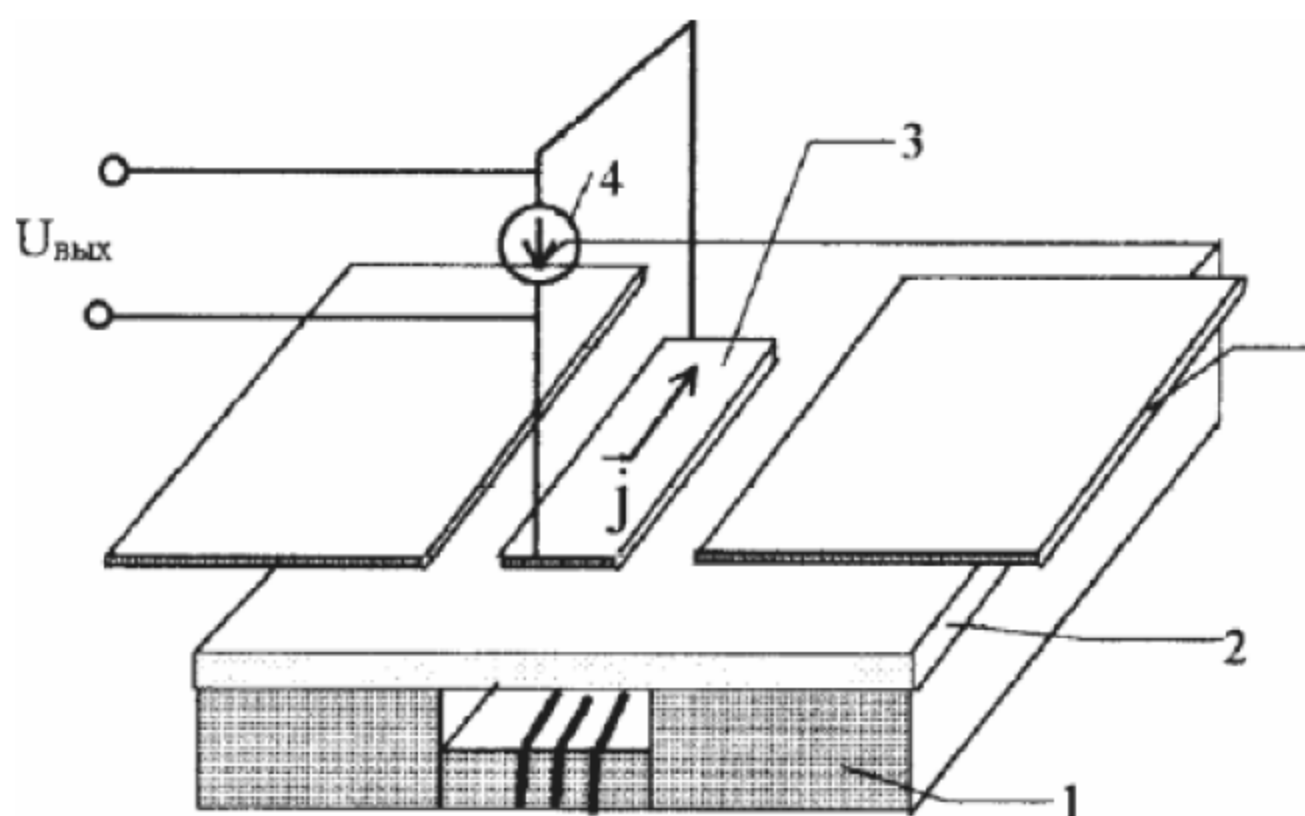


Рис. 1.5. Горизонтальная ТМРГ: 1 – электромагнит; 2 – стеклянная подложка; 3 – МРЭ; 4 – источник тока детектирования; 5 – НМЗ

Данные недостатки в значительной мере можно устранить, используя магнитные экраны и уменьшая ширину МРЭ. Первый способ трудно выполним как конструктивно, так и технологически, а второй ограничен технологическими возможностями фотолитографии.

Этих недостатков лишены ТМРГ вертикальной конструкции. В них абразивное воздействие НМЗ принимает на себя твердый материал подложки, предохраняя МРЭ от разрушения, а возможность применения магнитных экранов или потокособирающих магнитных сердечников повышает разрешающую способность таких головок.

Первая конструкция вертикальной ТМРГ была реализована одновременно с горизонтальной. Она представлена на рис. 1.6, а ее волновая характеристика – на рис. 1.7. Источником магнитного поля смещения в данной ТМРГ служил постоянный миниатюрный магнит, местоположение которого относительно МРЭ, а значит, и величина поля смещения регулировались с помощью специального винта.

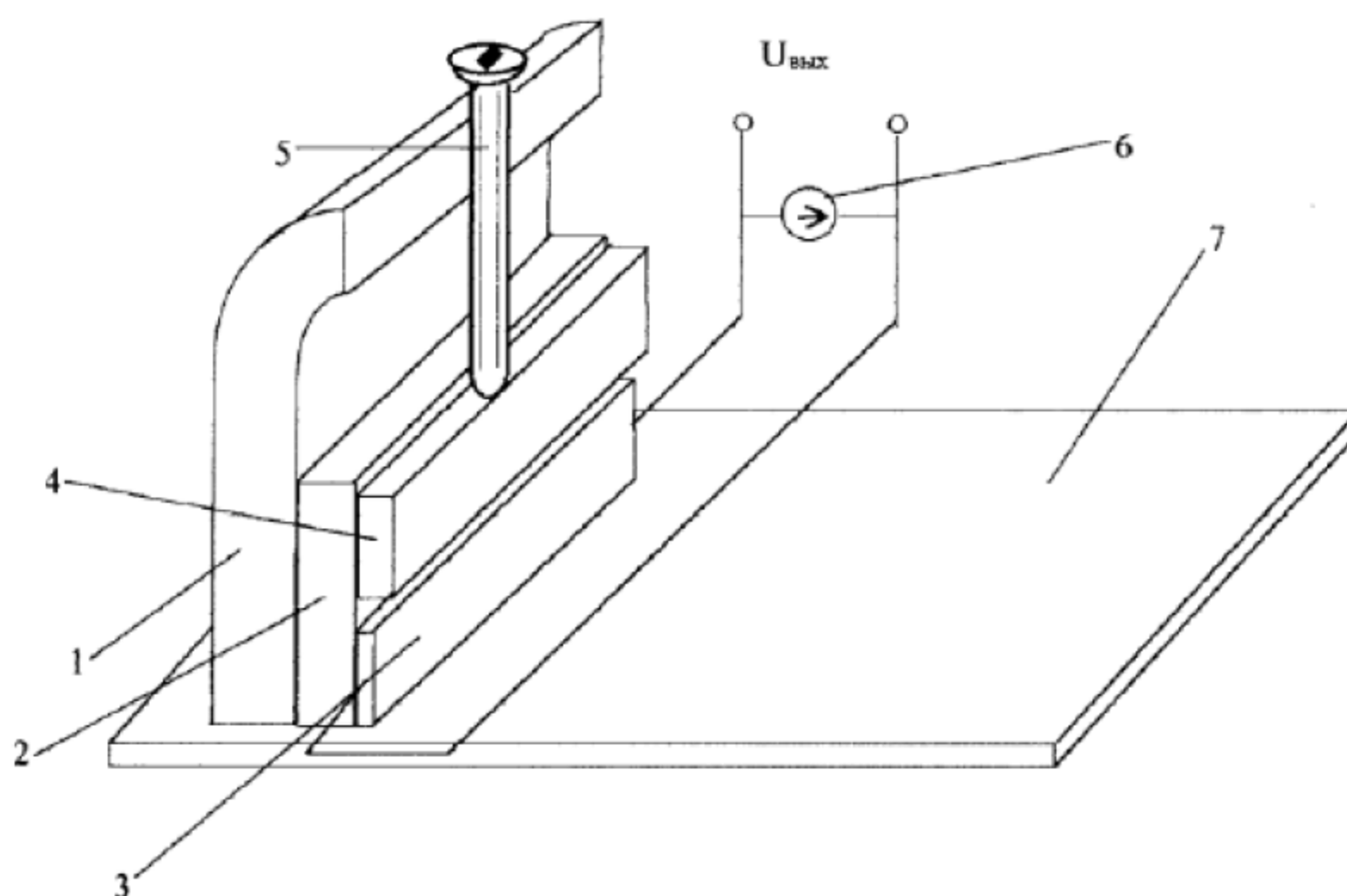


Рис. 1.6. Вертикальная ТМРГ:

1 – корпус; 2 – стеклянная подложка; 3 – МРЭ; 4 – смещающий магнит; 5 – регулировочный винт; 6 – источник тока детектирования;

7 – НМЗ

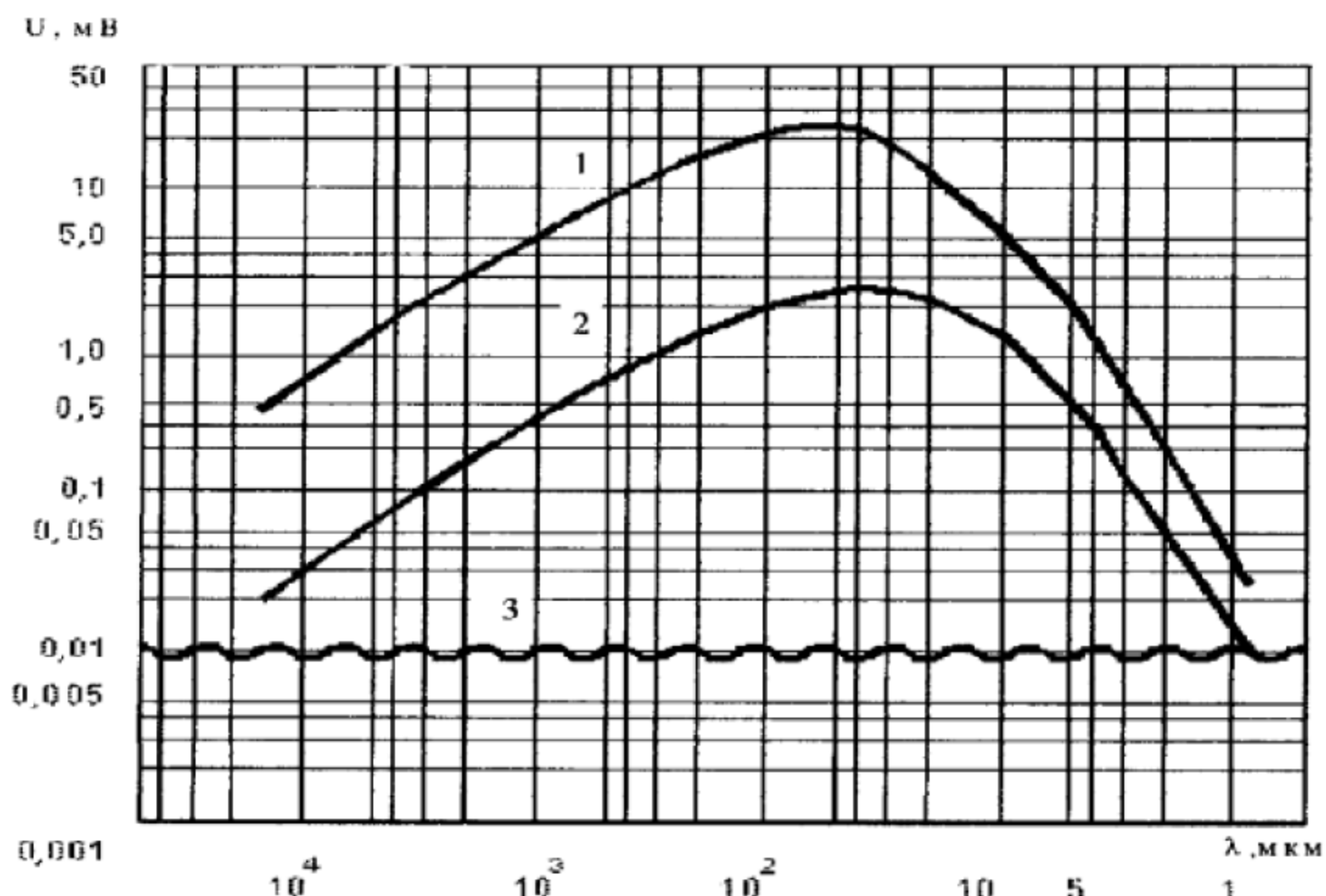


Рис.1.7. Экспериментальные волновые характеристики ТМРГ (1), дискретной магнитоиндуктивной головки (2) и уровня шума НМЗ (3)

Рассмотренные выше конструкции ТМРГ имели гибридное исполнение. Переход от гибридной технологии к тонкопленочной решил проблему группового изготовления ТМРГ. Общность технологических процессов, применяемых при создании современных ТМРГ, определяет и их конструктивную общность. Несмотря на большое разнообразие конструкций современных головок, главное их отличие друг от друга заключается в решении проблемы смещения МРЭ и разрешающей способности ТМРГ. Проблема разрешающей способности решается за счет применения магнитных экранов, между которыми располагают МРЭ, или потокособирающего магнитного сердечника с дополнительным зазором и встроенным в него МРЭ. Кроме того, ввиду принципиальной невозможности ра-

боты ТМРГ в режиме записи, часто в одной головке совмещают воспроизводящий МРЭ и катушку записи, которая при работе в режиме воспроизведения может использоваться в качестве катушки магнитного МРЭ [18]. Такие комбинированные головки индуктивной записи и магниторезистивного воспроизведения являются в настоящее время самыми совершенными.

ТМРГ, в которых высокая линейная разрешающая способность обеспечивается применением магнитных экранов, называются экранированными тонкопленочными магниторезистивными головками (ЭТМРГ). Наиболее совершенная конструкция таких головок представлена на Рис. 1.8.

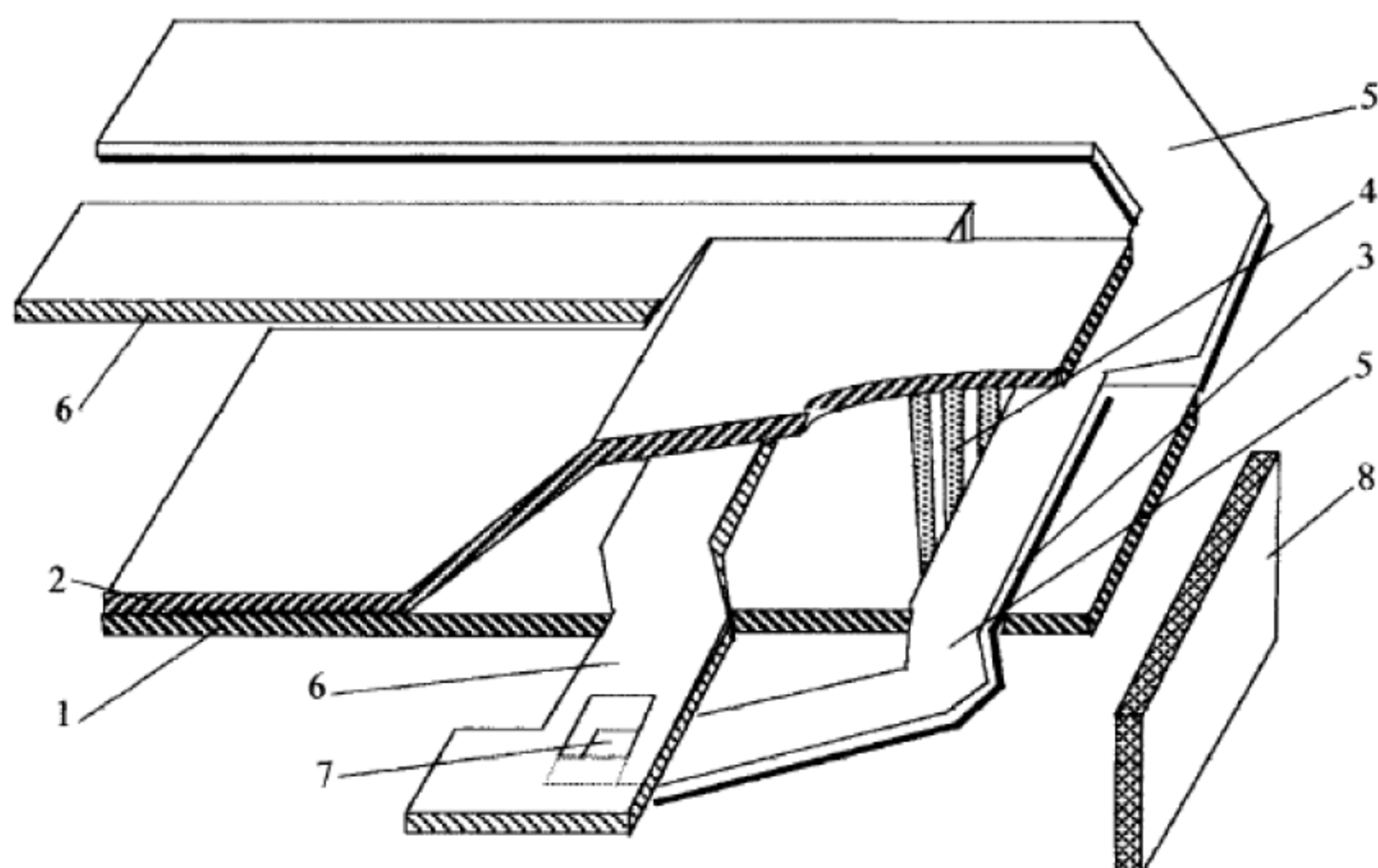


Рис. 1.8. Комбинированная тонкопленочная магнитная головка индуктивной записи и магниторезистивного воспроизведения: 1 и 2 – ветви магнитного сердечника; 3 – МРЭ; 4 – эквипотенциальные полосы; 5 – токоведущие полосы; 6 – одновитковая катушка записи; 7 – контактная площадка; 8

– НМЗ

Простота конструкции и широкий квазилинейный диапазон входного сигнала этой головки обеспечивается применением электрически смещенного МРЭ. Сам элемент расположен в рабочем зазоре магнитного сердечника, при этом последний при работе головки в режиме воспроизведения экранирует МРЭ от паразитных полей рассеяния, создаваемых близлежащими полями с воспроизводимыми переходами намагниченности на НМЗ. Наличие катушки записи, которая для удобства показана одновитковой, позволяет данной головке работать и в режиме записи. Экспериментальная волновая характеристика и геометрические размеры данной ЭТМРГ приведены на рис. 1.9.

U/U_{\max} , дБ

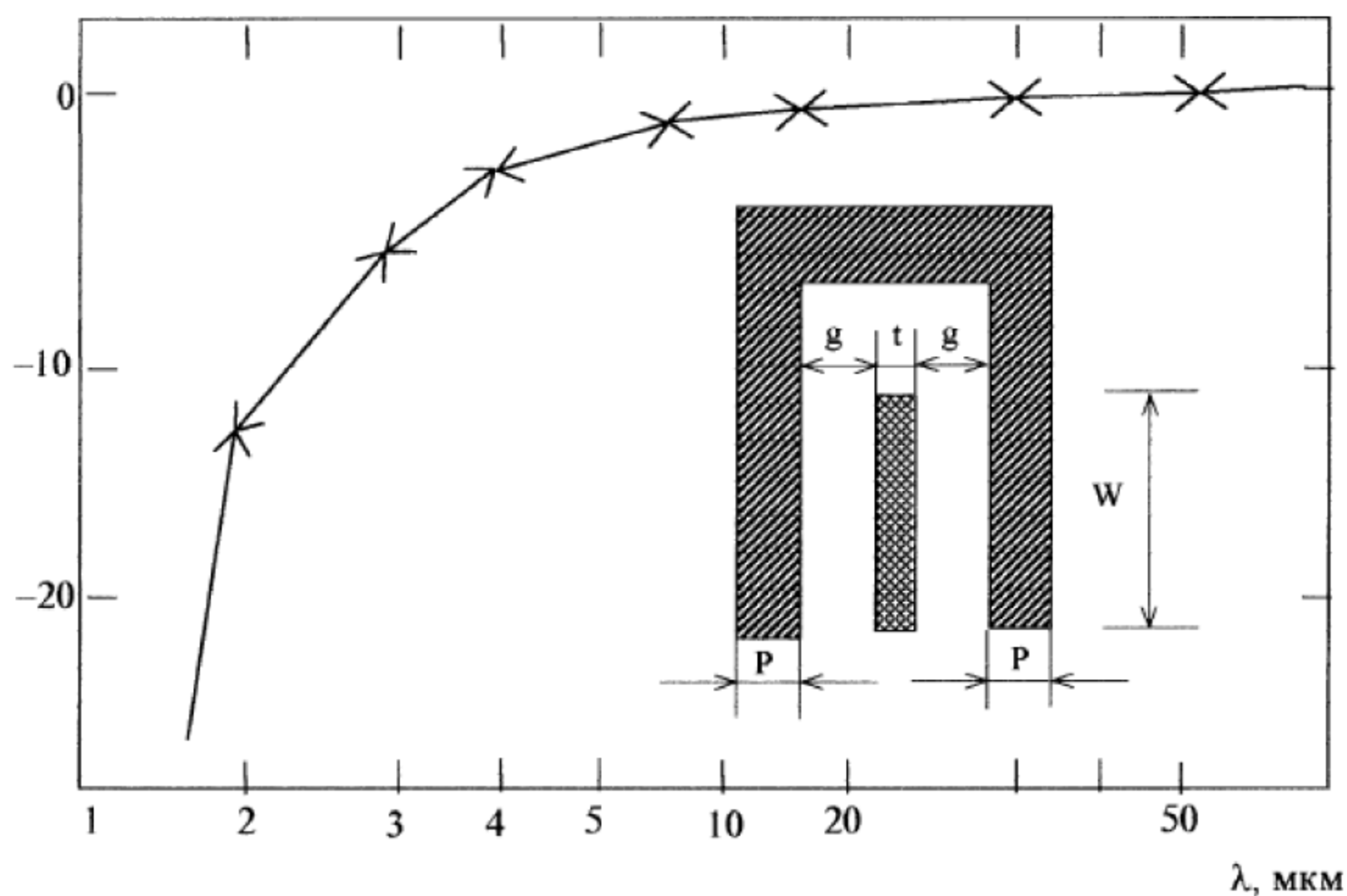


Рис. 1.9. Экспериментальная волновая характеристика экранированной ТМРГ, нормализованная по амплитуде выходного сигнала при $L = 50$ мкм ($W = 10$ мкм; $p = 2,8$ мкм; $2g = 2,16$ мкм; $t = 0,04$ мкм)

Несмотря на целый ряд достоинств, ЭТМРГ присущи следующие основные недостатки:

- а) невысокая чувствительность, вызванная сильной неоднородностью распределения сигнального магнитного поля по ширине МРЭ;
- б) ограниченная надежность работы и достаточно высокий уровень фрикционного термического шума, обусловленные абразивным действием НМЗ на МРЭ.

С целью устранения этих недостатков в последние годы стали интенсивно разрабатываться ТМРГ, в которых МРУ встраивают в дополнительный зазор потокособирающего магнитного сердечника [19 – 21]. Такие головки принято называть потокособирающими тонкопленочными магниторезистивными головками (ПТМРГ, рис. 1.10). Она также является комбинированной, так как содержит катушку записи, которая при работе в режиме воспроизведения обеспечивает смещение МРЭ.

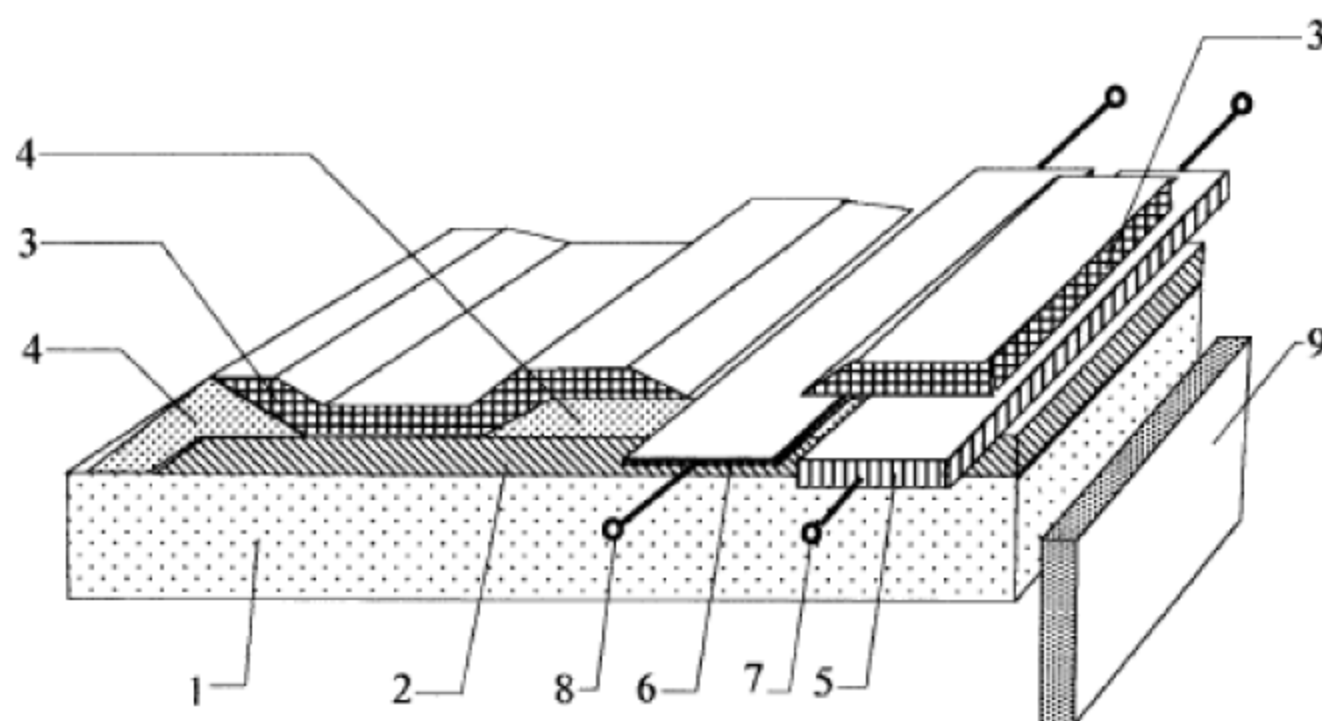


Рис. 1.10. Комбинированная тонкопленочная магнитная головка индуктивной записи и магниторезистивного воспроизведения:
 1 – подложка; 2 и 3 – нижняя и верхняя ветви магнитного сердечника;
 4 – диэлектрические слои; 5 – одновитковая катушка записи-смещения; 6 – МРЭ; 7 и 8 – токоведущие дорожки; 9 – НМЗ

К сожалению, существующие ПТМРГ не реализуют полностью потенциальные возможности, присущие потокособирающим конструкциям. Их общим недостатком является большое магнитное сопротивление до-

полнительного зазора со встроенным в него МРЭ, которое значительно снижает чувствительность этих головок, делая ее иногда даже ниже, чем у аналогичных ЭТМРГ.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛОСКИХ СПАЯХ

Среди множества проблем, возникающих в процессе производства аппаратуры магнитной записи, при использовании спая стекло-видного диэлектрика с металлом, основной является проблема напряжений в спаях (проблема растрескивания стекла в спаях при изготовлении или в процессе эксплуатации). Наиболее актуальными в данном случае являются напряжения, возникающие из-за разницы в характеристиках теплового сжатия спаиваемых материалов. Одним из эффективных способов уменьшения напряжений является "отжиг спая", проведенный в любом режиме с целью получения желаемых напряжений в заданном интервале температур. В практике при выборе режима отжига спая технологи часто пользуются положениями, заимствованными из теории отжига стекла. Применительно к спаям эти положения далеко не всегда справедливы. Поскольку стекло обладает высоким модулем упругости и в то же время весьма хрупко, то даже очень небольшая рассогласованность спаиваемых материалов по КЛТР (коэффициент линейного термического расширения) приводит к возникновению больших напряжений и разрушению стекла в спае.

Теорию отжига спаев стекла с металлом и другими материалами на сегодняшний день никак нельзя считать завершенной. Многообразие свойств стекол, металлов и их сплавов, ситаллов, ферритов и т.д. чрезвычайно велико. Разнообразны и зачастую очень сложны типы спаев. Поэтому все, что сделано к настоящему времени в области теоретического и экспериментального изучения влияния разнообразных факторов на напряжения в спаях, требует дальнейшего развития.

В связи с этим в данной главе исследованы различные аспекты релаксации напряжений в двойных, тройных спаях при производстве многодорожечных и видеоголовок.

2.1. Метод расчета температурных полей в спаях стекловидного диэлектрика с металлом

В настоящее время в различных областях науки и техники существенно расширяется применение стекловидных диэлектриков в качестве высокотемпературных покрытий, что и обуславливает интерес к изучению и описанию зависимостей свойств уникального материала при изменении его состава и условий тепловой обработки. Несмотря на многообразие покрываемых материалов и методов получения высокотемпературных покрытий (наплавление из пиропаст и пиросуспензий, плазменное напыление, осаждение из парогазовой фазы, диффузионное насыщение в газе из смеси порошков и т.д.), наиболее важным для теории и практики высокотемпературных покрытий является их термостойкость [22].

При разработке вопросов термостойкости стекловидных покрытий лучше идти по пути расчета температурных полей и напряжений, возникающих в покрытии в различных условиях службы изделий. Рассчитав температурные напряжения, можно определить допустимые для данного покрытия границы применения.

Поскольку покрытие имеет значительно меньшую толщину по сравнению с покрываемой деталью, остановимся на нахождении температурных полей в наиболее простом варианте – покрытии по плоскости, которое достаточно полно будет описывать распределение температур в покрытиях, и рассмотрим задачу охлаждения (нагрева) полосы металла, покрытой с двух сторон стекловидным диэлектриком. Математически эту задачу можно определить следующим образом (рис. 2.1):

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial z^2}; \quad 0 < z < h, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial z^2}; \quad -h_1 < z < 0, \quad (2.2)$$

где θ_1 и θ_2 – избыточные температуры в покрытии и полосе; a_1 и a_2 – температуропроводность покрытия и полосы; t – время нагревания (охлаждения); z – координата; h и h_1 – толщина покрытия и половина толщины полосы.

Теплообмен на границе раздела «покрытие – внешняя среда» путем конвекции происходит при граничных условиях:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial z} = -b_1 \theta_1 \quad (\text{при } z=h), \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial z} + b_2 \theta_2 = 0 \quad (\text{при } z=h_1). \quad (2.4)$$

Здесь $b_1 = \frac{x}{\lambda_1}$, где λ_1 – теплопроводность покрытия; x – коэффициент теплоотдачи на границе раздела «покрытие – внешняя среда».

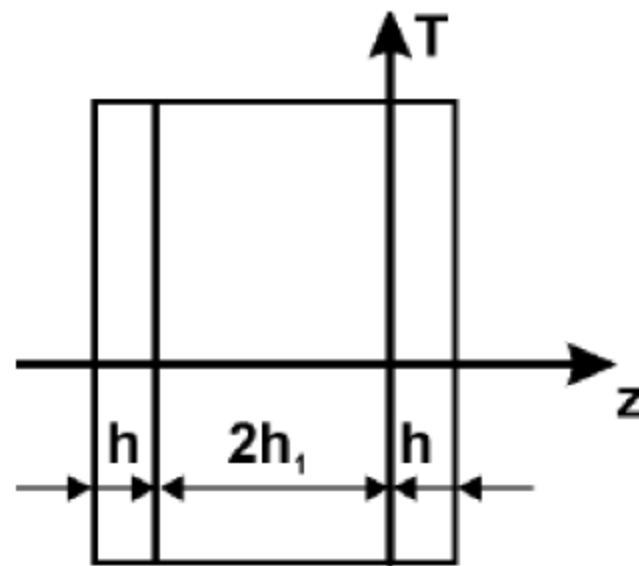


Рис. 2.1. Схема полосы металла с покрытием стекловидного диэлектрика

При $b_2=0$ получаем

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad (\text{при } z=-h_1), \quad (2.4')$$

где b_2 – теплопроводность полосы.

Кроме того, на границе раздела «покрытие – полоса» имеем дополнительные граничные условия:

$$\theta_1 = \theta_2 \quad (\text{при } z=0), \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial z} = b_3 \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \quad (\text{при } z=0), \quad (2.6)$$

где b_3 – теплопроводность полосы.

Начальное условие имеет вид

$$\theta = \theta_0(z) \quad (\text{при } t=0), \quad (2.7)$$

где $\theta_0(z)$ – начальная избыточная температура полосы и покрытия по отношению к внешней среде.

Для решения поставленной задачи применяем метод разделения переменных Фурье при дополнительных предположениях для получения решения в явном виде [23]:

$$h \ll 1, \quad \frac{h}{h_1} \ll 1. \quad (2.8)$$

Разлагая полученное решение в ряд по степеням h и ограничиваясь конечным числом слагаемых, количество которых определяется погрешностью начальных условий, мы получаем достаточно простые уравнения для нахождения собственных чисел задачи (2.1) – (2.7).

Сделаем в уравнении (2.1) и граничном условии (2.3) замену переменных:

$$x = \frac{z}{h}. \quad (2.9)$$

Тогда уравнения (2.1) и (2.3) запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} = \frac{a_1}{h^2} \cdot \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2}; \quad 0 < x < 1, \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial x} = -b_1 h \theta_1 \text{ (при } x=1 \text{)}. \quad (2.11)$$

Методом Фурье [24] определяем частное решение уравнения (2.10) в виде

$$U_1(x, t) = T_1(t) \cdot X_1(x),$$

тогда

$$U_1(x, t) = T_1 \cdot X_1 = e^{-\frac{a_1 \omega^2}{h^2} t} (A \cos \omega x + B \sin \omega x). \quad (2.12)$$

Для удовлетворения начальным условиям, подставляя (2.12) в (2.11), приходим к следующему равенству:

$$\begin{cases} x_1 - 1 = -b_1 h x_1 - 1, \\ -A \sin \omega + B \omega \cos \omega = -b_1 h A \cos \omega + B \sin \omega. \end{cases} \quad (2.13)$$

После решения задачи (2.1) с ее граничными условиями переходим к частному решению задачи (2.2) при граничном условии (2.4):

$$V_2(t, z) = e^{\frac{-a_1 \omega^2}{h^2} t} \left(A \cos \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \frac{\omega}{h} z + D \sin \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \frac{\omega}{h} z \right). \quad (2.14)$$

Функция (2.14) есть частное решение задачи (2.2), удовлетворяющее условию (2.15):

$$U_1(t, x) \Big|_{x=0} = A e^{\frac{-a_1 \omega^2}{h^2} t} = V_2(t, z) \Big|_{z=0} = e^{-\lambda^2 t} \cdot C. \quad (2.15)$$

Подставляем (2.14) в граничное условие (2.4) и затем (2.14) и (2.12) в граничное условие (2.6). Окончательно получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \frac{\omega}{h} \sin \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \frac{\omega}{h} h_1 + \frac{1}{b_2} \frac{B}{A} \frac{\omega}{h} \cos \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \frac{\omega}{h} h_1, \\ b_2 \left\{ \cos \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \frac{\omega}{h} h_1 - \frac{1}{b_3} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \frac{B}{A} \sin \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \frac{\omega}{h} h_1 \right\} = 0, \\ -\frac{\omega}{h} \sin \omega + \frac{B}{A} \frac{\omega}{h} \cos \omega = -b_1 \left\{ \cos \omega + \frac{B}{A} \sin \omega \right\}. \end{cases} \quad (2.16)$$

Анализируя систему (2.16), замечаем, что $\frac{\omega}{h} = \varphi(h)$, т.е.

$\omega = h \cdot \varphi(h)$ и $\varphi(0) \neq 0$, т.е. $\omega = C_1 h + C_2 h^2 + C_3 h^3 + \dots$

Аналогично:

$$\frac{B}{A} = \frac{B}{A} h = d_0 + h d_1 + h^2 d_2 \dots,$$

где через d_k обозначим коэффициенты разложения при h^k выражения по степеням h .

Подставляем в (2.16) разложения по степеням h функции ω и $\left(\frac{A}{B}\right)$ и положим в полученных равенствах $h = 0$. В результате приходим к системе уравнений для нахождения нулевых членов асимптотики по h функции ω и $\frac{A}{B} \rightarrow C_1$ и d_0 :

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} C_1 h_1 = \frac{b_1 - b_2 b_3}{\sqrt{\frac{a_1}{a_2}} C_1 + \frac{b_1 b_3}{b_2 C_1} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}}; \\ d_0 = -\frac{b_1}{C_1}. \end{cases} \quad (2.17)$$

Первое уравнение системы (2.17) является трансцендентным и имеет бесчисленное множество корней $C_{11}, C_{12}, \dots, C_{1n} \dots$

Для того чтобы удовлетворить начальным условиям (2.7), ищем решение задачи (2.1) – (2.7) в виде

$$\theta_1(t, x) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{\frac{-a_1 \omega_n^2}{h^2} t} A_n \cos \omega_n x + B_n \sin \omega_n x.$$

Возвращаясь к переменной z (2.9) и учитывая, что

$$\frac{B}{A} = d_0 + d_1 h + d_2 h + \dots,$$

т.е.

$$B_n = A_n (d_{0n} + d_{1n}h + d_{2n}h^2 + \dots) = A_n d_n(h), \quad (2.18)$$

окончательно получим:

$$\theta_1(t, z) = \sum_{h=0}^{\infty} e^{\frac{-a_1 \omega_n^2}{h^2} t} A_n \left(\cos \omega_n \frac{z}{h} + d_n \sin \omega_n \frac{z}{h} \right), \quad (2.19)$$

$$\theta(t, z) = \sum_{h=0}^{\infty} V_n(t, z) = \sum_{h=0}^{\infty} e^{\frac{-a_1 \omega_n^2}{h^2} t} \left(A_n \cos \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \frac{\omega_n}{h} z + D_n \sin \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \frac{\omega_n}{h} z \right). \quad (2.20)$$

Учитывая равенство (2.18), получим:

$$D_n = \frac{1}{b_3} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} B_n = \frac{1}{b_3} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} A_n d_n(h). \quad (2.21)$$

Подставляя соотношение (2.21) в выражение для $\theta_2(t, z)$, приходим к следующему:

$$\theta_2(t, z) = \sum_{h=0}^{\infty} e^{\frac{-a_1 \omega_n^2}{h^2} t} A_n \left(\cos \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \frac{\omega_n}{h} z + \frac{1}{b_3} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} d_n \sin \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \frac{\omega_n}{h} z \right). \quad (2.22)$$

Подставляя (2.19), (2.20) в начальное условие (2.7), получим:

$$\begin{cases} \theta_1(0, z) = \theta_0(z) & 0 < z < h, \\ \theta_2(0, z) = \theta_0(z) & -h_1 < z < 0 \end{cases}$$

или

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n U_n(z) = \theta_0(z), \quad (2.23)$$

$$U_n(z) = \begin{cases} \cos \omega_n \frac{z}{h} + d_n \sin \omega_n \frac{z}{h}, & 0 < z < h, \\ \cos \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \frac{\omega_n}{h} z + \frac{1}{b_3} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} d_n \sin \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \frac{\omega_n}{h} z, & -h_1 < z < 0. \end{cases} \quad (2.24)$$

Во второй формуле равенства (2.24) сделаем замену:

$$\sqrt{\frac{a_1}{a_2}}z = y. \quad (2.25)$$

Введя единую переменную x , получим:

$$U_n(x) = \begin{cases} \cos \omega_n \frac{x}{h} + d_n \sin \omega_n \frac{x}{h}; & 0 < x < h \\ \cos \frac{\omega_n}{h} x + \frac{1}{b} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} d_n \sin \frac{\omega_n}{h} x; & -h \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} < x < 0. \end{cases} \quad (2.26)$$

Легко можно проверить, что функции $U_n(x)$ ортогональны, т.е.

$$\int_{-h \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}}^h U_n(x) U_m(x) dx = 0, \quad (2.27)$$

где $n \neq m$.

Сделаем в выражении (2.23) замену (2.25), получим:

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n U_n(x) = \theta_1(x), \quad (2.28)$$

где

$$\theta_1(x) = \begin{cases} \theta_0(x), & 0 < x < h \\ \theta_0\left(\sqrt{\frac{a_2}{a_1}}x\right) & -h \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} < x < 0. \end{cases} \quad (2.29)$$

Умножим ряд (2.28) на $U_m(x)$ и проинтегрируем в пределах $\left[-h \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, h\right]$.

Тогда, учитывая (2.27), получим:

$$A_m \int_{-h_1 \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}}^h U_m^2 x dx = \int_{-h_1 \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}}^h \theta_1 x \cdot U_m x dx. \quad (2.30)$$

Из равенства (2.30) находим коэффициент A_m , тем самым удовлетворено начальное условие (2.7) и задача (2.1) – (2.7) полностью решена.

По формулам (2.19), (2.20) можно установить температурные поля в покрытии (стекла) и металле (полосе) при различных условиях теплообмена на границе «покрытие – окружающая среда».

Расчеты проведены для покрытий, составы которых представлены в табл. 2.1. Составы стекловидных диэлектриков и теплофизические параметры взяты из работ [25,26].

Таблица 2.

Состав исследуемых покрытий (вес. %)

Покрывааемый материал	Шифр покрытия	SiO ₂	B ₂ O ₃	MgO	Sb ₂ O ₃	Li ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O	CS ₂ O	Al ₂ O ₃	Прочие сплавы
Технический титан ВТ-1	A ₁	67	4	10	1	14	2	2	-	-	-
Сталь СТ-3	A ₂	44	15	-	-	-	15	8	-	5	13

Покрытия наносили на полосы технического титана ВТ-1 и стали СТ-3 методом центрифугирования суспензий стекловидного диэлектрика. Испытания проводили сбрасыванием образцов, нагретых до определенной температуры, в резервуар с холодной водой.

Приведенные на рис. 2.2 и 2.3 результаты расчетов по формулам (2.19) и (2.20) показывают, что изменения температуры в покры-

тии со временем определяются в основном величиной критерия C_i , который характеризует скорость теплообмена на границе:

$$C_i = N \cdot \frac{h}{\lambda_1}, \quad (2.31)$$

где h – толщина покрытия; λ_1 – теплопроводность покрытия $N = \frac{x}{\lambda_1}$.

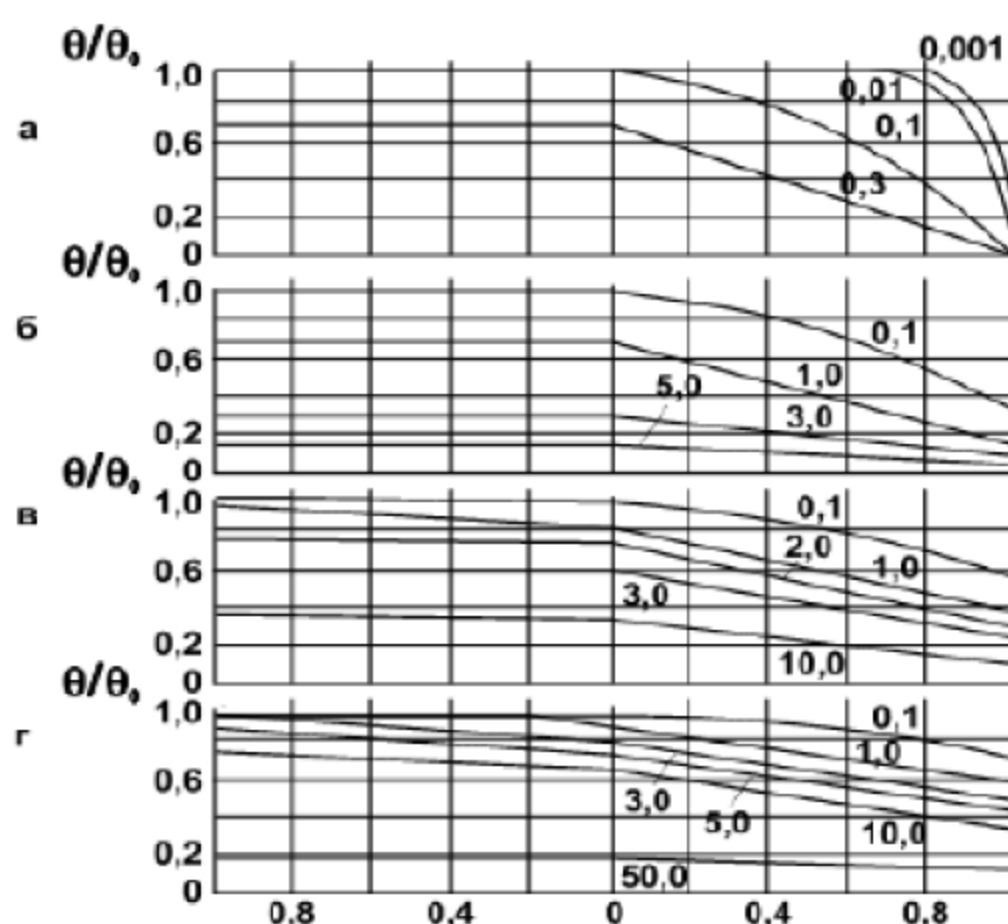


Рис. 2.2. Распределение температуры в покрытии и металле при охлаждении:

система A2 – $C_i=100$ (а) и 10 (б); система A1; $C_i=2$ (в) и 0,7 (г); цифры

у кривых – значения Fo $\left(Fo = \frac{at}{h^2} \right)$

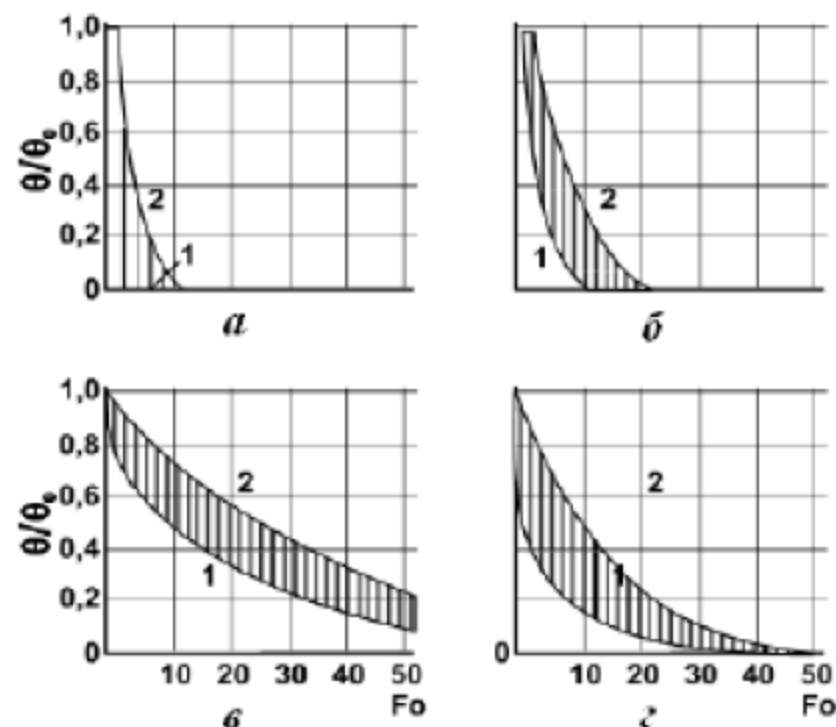


Рис. 2.3. Изменение температуры на поверхности покрытия (1) и на границе покрытия с металлом (2) от времени охлаждения:
система A2 – $C_i=100$ (а) и 10 (б); система A1; $C_i=2$ (в) и 0,7 (г); цифры у кривых – значения Fo $\left(Fo = \frac{at}{h^2} \right)$

Вариант для $C_i = 100$ на рис. 2.2 и 2.3 показан условно, так как достичь таких больших значений критерия C_i в наших условиях не представлялось возможным.

Для реальных покрытий (при небольших толщинах) значение критерия C колеблется в пределах от 0,1 до 100. При $C_i < 0,1$ температуру по всему сечению покрытия можно принять постоянной, т.е. градиентом температуры можно пренебречь, а при $C_i > 100$ температуры поверхности и окружающей среды выравниваются и формулы (2.19) и (2.20) значительно упрощаются.

Как следует из рис. 2.3, с увеличением критерия C_i охлаждение происходит быстрее. Однако разница между температурами внешней и внутренней границ покрытия возрастает, что приводит к увеличению напряжений в покрытиях при более резких температурах.

Полученные результаты использованы для разработки алгоритмов расчетов напряжений как в стекле, так и в его спаях с другими материалами, в том числе с другими стеклами [27].

2.2. Модель релаксации напряжений

2.2.1. Расчет релаксации напряжения в нестабилизированном стекле при несоблюдении принципа термореологической простоты

В последние годы релаксационная модель отжига и закалки стеклоизделий находит все более широкое применение для решения множества практических задач [28,29,30]. Эти задачи, отличающиеся разнообразием температурно-временных режимов, требуют дальнейшего совершенствования указанной модели. К сожалению, методика исследования релаксации напряжений Рехсона и Мазурина за прошедшие двадцать лет не нашла широкого распространения. Причина в некоторой фрагментарности ее описания, затрудняющей воспроизведение. В этом подразделе приводится один из вариантов уточнения модели, а именно – отказ от допущения о термореологически простом поведении стекла в интервале его стеклования и введении зависящего от температуры распределения времен релаксации структуры и напряжения.

Основанием для сомнений в общности принципа термореологической простоты, введение которого в литературу по неорганическим стеклам явилось следствием результатов работ де Баста и Жильяра и Кекджена, послужили данные, приведенные в [31]. В работе

[32] впервые в широких интервалах температур и времен было выполнено исследование закономерностей релаксации напряжений в двух промышленных стеклах, стабилизированных при некоторых температурах в интервале стеклования. Близость результатов [32] к приведенным в [31] наблюдалась лишь для средней части релаксационной кривой и в области больших времен в координатах $\sigma(t)/\sigma(0) - \lg t$ (σ – напряжение, t – время). При малых временах наблюдалось систематическое изменение формы релаксационной кривой при изменении температуры опыта, свидетельствующее о расширении спектра времен релаксации напряжения при снижении температуры.

Имеется ряд работ, в которых выполнялись исследования релаксации напряжений в нестабилизированном стекле [33 – 35]. Однако в этих работах расчеты временных зависимостей напряжений на основе релаксационных теорий носили весьма ограниченный характер. Расчеты релаксации напряжений в нестабилизированном стекле входили составной частью в алгоритмы расчета напряжений при отжиге и закалке листового стекла, а также в спаях стекла с металлом. И в том, и в другом случаях в алгоритмах принимался за основу принцип термореологической простоты, что значительно упрощало алгоритм вычислений. В то же время такое упрощение не приводило к выходу различий между расчетом и экспериментом за пределы погрешности последнего в условиях ограниченного набора вариантов температурно-временных режимов.

Исследования релаксации напряжений выполнялись на усовершенствованном варианте релаксометра [36]. Общая последователь-

ность выполнения измерений была следующей. Образец стекла (Si-15-1) в форме цилиндрической пружины стабилизировался при некоторой температуре T в течение времени, достаточного для завершения структурной релаксации (т.е. до состояния, при котором достигалось равенство фактической и структурной температур $T = T_f$), и затем резко охлаждался путем извлечения его из печи на воздух, помещался в печь релаксометра, предварительно нагретую до температуры меньшей, чем температура стабилизации образца, и выдерживался там 15 мин для достижения им температуры печи. После этого образец деформировался на некоторую величину, остававшуюся далее постоянной, и регистрировались изменяющиеся во времени значения возникших при деформировании напряжений.

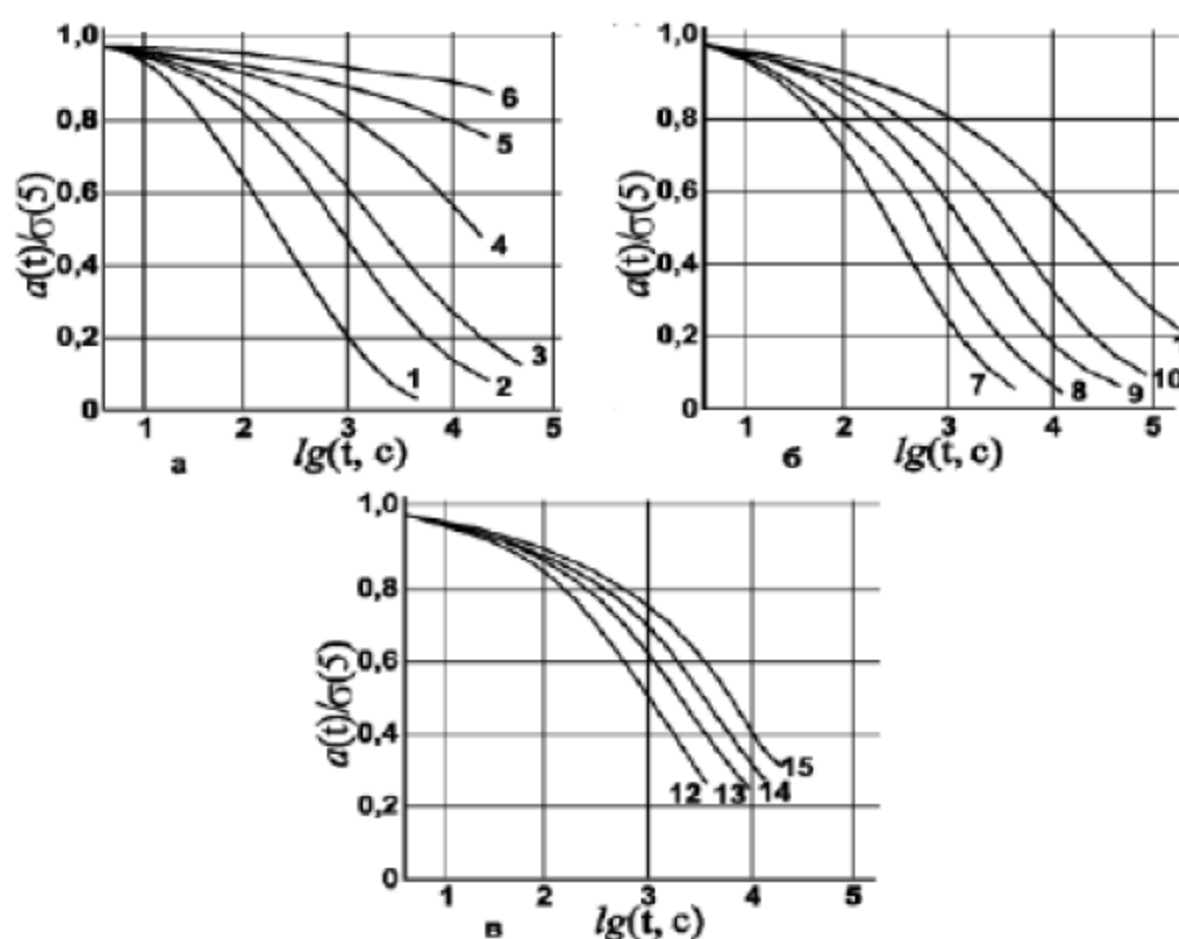


Рис. 2.4. Релаксация напряжений в стабилизирующемся стекле Si-15-1. Температура предварительной стабилизации T_f °С: а – 600, б – 540, в – 532. Температура эксперимента T , °С: 1 – 495, 2 – 460, 3 – 440, 4 – 400, 5 – 350, 6 – 300, 7 – 511, 8 – 497, 9 – 482, 10 – 468.5, 11 – 444, 12 – 494, 13 – 481, 14 – 474, 15 – 466

Наиболее подробные исследования были выполнены на образцах из стекла Si-15-1 ($T_g = 534$ °C). Значения начальных структурных температур у образцов изменялись от 600 до 532 °C, а температур релаксации напряжений – от 511 до 350 °C. Результаты этих опытов приведены на рис. 2.4 (здесь и далее для удобства представления экспериментальных данных и сравнения с расчетом принята нормировка по пятисекундному значению напряжения $\sigma(5)$).

Математическая обработка полученных результатов была выполнена по алгоритму, имеющему много общего с алгоритмами работ [37]. В предположении термореологической простоты расчет релаксации напряжений в этих алгоритмах выполнялся по следующему уравнению:

$$\frac{\sigma(t)}{\sigma(0)} = \sum_{i=1}^n g_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (2.32)$$

где g_i – весовой коэффициент (удельный вклад) i -го процесса, причем

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1; \quad t – \text{время}; \quad \tau_i – \text{время релаксации, связанное с величиной}$$

вязкости η и постоянной K_i , не зависящей от температуры и численно равной значению вязкости при $\tau_i = 1$. Таким образом, распределение времен релаксации, полностью описываемое наборами значений (g_i, K_i) , оставалось одним и тем же при любой температуре.

Релаксационная теория стеклования позволяет рассчитывать изменения свойств стекол в интервале стеклования при разнообразных режимах термообработки. В соответствии с этой моделью расчет

указанных изменений выполнялся, когда были определены следующие 3 группы параметров.

1. Параметры, определяющие температурную зависимость вязкости.

В соответствии с уравнением, описывающим зависимость вязкости от температуры в широком интервале температур, по экспериментальным данным определялись постоянные A_η , B_η и $T_{0\eta}$ исследуемого стекла. Для этого потребовалось измерить температурную зависимость вязкости стабилизированного стекла в возможно более широком интервале, чтобы как можно надежнее установить искомую зависимость. Для моделирования изменений свойств при скоростях в несколько Кельвинов в минуту и температурах стабилизации T_g выше 40 К минимально допустимым считался интервал вязкости $10^{10} - 10^{14}$ дПас.

2. Параметры расчета температурно-временных изменений объема.

К числу этих параметров относятся температурные коэффициенты линейного расширения расплава α_l и стекла α_g , причем последний практически для любых стекол оказывается зависящим от температуры, а в некоторых случаях и от структурной температуры. Эти значения были определены экспериментально по дилатометрическим кривым, полученным в режимах охлаждения и последующего нагревания с постоянной скоростью изменения температуры.

3. Параметры, определяющие кинетику структурной релаксации.

К числу этих параметров относятся: величина отношения вязкости ко времени релаксации K_s , показатель степени в уравнении Кольрауша b_s и характеристика изоструктурной температурной зависимости вязкости τ_0 .

Перечисленные выше константы вычислялись путем минимизации среднеквадратичного отклонения между значениями свойства P , найденными экспериментально в режиме термообработки и рассчитанными по модели для этого же режима.

В ходе выполнения работы применялись самые разнообразные методы оптимизации различных функционалов: покоординатного и наискорейшего спуска, симплекс-метод множителей Лагранжа и др. Поскольку, с одной стороны, довольно часто точность расчета оказывается выше точности реального эксперимента, а с другой стороны, большая часть входящих в модель уравнений – гладкие функции без особенностей, то правильный выбор конкретного алгоритма оптимизации зависит от особенностей решаемой задачи. В некоторых случаях значения констант, вычисленные без учета особенностей поведения стекла в интервале стеклования и реального эксперимента, могут содержать значительные погрешности. Это может привести к большим ошибкам при расчете изменений свойств стекла в режимах, существенно отличающихся от того режима, для которого подбирались константы. Некоторые исследователи, определив константы без должного анализа метода их расчета, даже склонны были думать о неприменимости представлений релаксационной теории стеклования для выполнения каких-либо более или менее надежных расчетов.

Математическая модель релаксационной модели стеклования позволяет определять значение относительного удлинения образца как функцию времени и значений трех релаксационных параметров: показателя дробной экспоненты b_s , константы K_s и изоструктурного времени релаксации τ_0 , т. е.

$$\varepsilon = \varepsilon(t, b, K, \tau_0). \quad (2.33)$$

В результате сопоставления расчетной дилатометрической кривой с измеренными в эксперименте значениями удлинения образца для экспериментального температурно-временного режима определялись значения параметров структурной релаксации. Технически такие расчеты выполнялись путем минимизации следующего функционала:

$$\lg \eta_0 = \lg \tau_0 + \lg K, \quad (2.34)$$

где $e(t_n)$ – измеренное относительное удлинение в момент времени t_n , а суммирование ведется по всем экспериментальным точкам.

Функционал (2.34) характеризует отклонение расчетной дилатометрической кривой от экспериментальной. Поэтому те значения b_s , K_s и τ_0 , для которых величина F минимальна, и являются значениями параметров структурной релаксации. Задача определения значений параметров структурной релаксации сводилась к задаче минимизации функции трех переменных $F(b, K, \tau_0)$.

Ввиду того, что влияние параметра τ_0 оказалось сравнительно слабым, для решения задачи минимизации был использован комбинированный метод, состоявший в следующем.

Для некоторого начального значения τ_0 при помощи градиентного метода определялись значения b_s , K_s , минимизирующие значе-

ние функционала F . Расчет проводился до сходимости по следующим формулам:

$$b^{k+1} = b^k - \varphi_k \frac{F(b^k, K^k) - F(b^{k-1}, K^k)}{b^k - b^{k-1}}, \quad (2.35)$$

$$\ln K^{k+1} = \ln K^k - \varphi_k \frac{F(b^k, K^k) - F(b^k, K^{k-1})}{\ln K^k - \ln K^{k-1}}, \quad (2.36)$$

где k – номер итерации, ψ_k и ϕ_k – итерационные параметры.

На каждой итерации анализировалось значение функции F . Если ее значение в результате итерации уменьшалось, шаг считался успешным. В случае пяти успешных шагов подряд значения ψ_k и ϕ_k удваивались. В том случае, когда в результате итерации значение F увеличивалось, делался откат на один шаг назад, а значения ψ_k и ϕ_k вдвое уменьшались. Итерации заканчивались, если изменение значений b , $\ln K$ на одном шаге становилось меньше, чем 10^{-4} .

Полученное таким образом для заданного τ_0 значение функционала F запоминалось. Затем для τ_0 задавалось другое – большее значение и снова находилась величина F . Если это значение функционала получалось меньше предыдущего, то новый шаг по τ_0 делался в том же направлении, если больше, то в противоположном. Процедура изменения τ_0 повторялась до тех пор, пока минимум F не оказывался внутри пройденного интервала. В этом случае зависимость $F(\tau_0)$ интерполировалась параболой, проходящей через 3 последние расчетные точки. Значение τ_0 , при котором эта парабола имела минимум, принималось за оптимальное значение изоструктурного времени ре-

лаксации. При этом оптимальном значении τ_0 находились окончательные значения b_s , K_s при помощи описанного выше метода.

Изложенный метод не накладывал никаких ограничений на температурно-временной режим эксперимента и применялся наряду с изложенным ниже для обработки экспериментальных зависимостей свойств в интервале стеклования.

Отказ от предположения о термореологической простоте, естественно, потребовал внесения в алгоритмы [37] изменений. В новом алгоритме коэффициенты g_i в (2.32) не зависели от температуры, а значения τ_i определялось по уравнению Фульчера – Таммана, используемому для описания температурной зависимости вязкости в широком интервале температур:

$$\lg \tau_i = A + B_i/(T - T_0) \quad (2.37)$$

или

$$\lg \tau_i = A_i + B_i/(T - T_0), \quad (2.38)$$

где A и T_0 – постоянные, общие для всех n экспонент суммы, а A_i , и B_i – постоянные, характерные только для i -го слагаемого этой суммы. Таким образом, в варианте (2.37) при стремлении обратной температуры к нулю значения всех τ_i стремились к одному и тому же значению τ_0 , что обеспечивало непрерывное сужение спектра времен релаксации с ростом температуры. Такое изменение спектра хорошо согласуется не только с данными [38], но и с большим объемом ультразвуковых исследований расплавов в широком интервале температур (см., например, [39]). Однако, если применение (2.37) не позволит описать имеющийся эксперимент с требуемой точностью, необходимо вводить коррекцию формы температурных зависимостей времен

релаксации для отдельных релаксационных процессов, переходя к варианту (2.38):

$$i = \eta / K_i. \quad (2.39)$$

Другое изменение алгоритма расчета касается температурных зависимостей времен релаксации в условиях «замороженной» структуры (при $T_f = \text{const}$). Такие зависимости описываются уравнением Аррениуса:

$$\lg \tau = \lg \tau_0 + B_g / T, \quad (2.40)$$

где τ_0 и B_g – постоянные. Так как в соответствии с релаксационной теорией стеклования при заданной температуре значения τ являются функцией структурной температуры, то одна из постоянных в (2.31) должна зависеть от T_f . В алгоритмах [37] предполагалось, что $\tau_0 = f(T_f)$ и B_g не зависит от T_f . В работе [32] впервые был принят противоположный принцип для расчета времен релаксации напряжений: τ_0 не изменяется с T_f , а $B_g = f(T_f)$. Для расчета времен релаксации структуры этот принцип был обоснован в [40].

Наиболее простым вариантом использования этого подхода является принятие допущения о равенстве значения τ_{oi} для всех n релаксационных процессов, т. е.

$$\tau_{o1} = \tau_{o2} = \tau_{o3} \dots = \tau_{on}, \quad (2.41)$$

однако это допущение не является обязательным, и в случае необходимости (если этого требует задача минимизации отклонений расчета от эксперимента) каждой постоянной τ_{oi} можно приписать свое собственное значение.

Итак, примененный здесь алгоритм с указанными изменениями может быть записан следующим образом:

$$T_{fi} = T - \int_0^t \exp \left[- \int_{t'}^t \frac{dt''}{\tau_i(t'')} \right] \frac{dT(t')}{dt'} dt'', \quad (2.42)$$

$$T_{ft} = \sum_{i=1}^n g_{it} T_{fi}, \text{ где } \sum_{i=1}^n g_i \tau = 1, \quad (2.43)$$

$$\lg \tau_i = \left(A_\tau + \frac{B_\tau}{T_{ft} - T_{o\tau}} \right) \frac{T_f}{T} - \lg \tau_0 \left(\frac{T_f}{T} - 1 \right), \quad (2.44)$$

$$\lg \tau_{i\sigma} = \left(A_{i\sigma} + \frac{B_{i\sigma}}{T - T_{oi\sigma}} \right) \frac{T_f}{T} - \lg \tau_{0\sigma} \left(\frac{T_f}{T} - 1 \right), \quad (2.45)$$

$$\sigma(t) = \sigma(0) \sum_{i=1}^n g_{i\sigma} \int_0^t \exp \left[- \frac{dt'}{\tau_{i\sigma}(t')} \right], \quad \sum_{i=1}^n g_{i\sigma} = 1. \quad (2.46)$$

Здесь переменные с индексом σ характеризуют величины, описывающие релаксацию напряжений, остальные переменные относятся к релаксации структуры. Как видно из уравнений (2.45) и (2.46), при расчете релаксации напряжений допускалось, что значения структурных температур при заданном структурном состоянии вещества для времен релаксации как структуры, так и напряжения совпадают.

На рис. 2.5 схематично показана зависимость времен структурной релаксации от T_f и T для $n = 3$, описываемая (2.45). Такой же будет и зависимость распределения времен релаксации напряжений (2.44), за тем исключением, что некоторые значения $A_{i\sigma}$ и τ_{0i} могут не совпадать. При этом зависимости 1 и 2 при $1/T \rightarrow 0$ могут не сходиться в одной точке на шкале ординат, как это изображено на рис. 2.5.

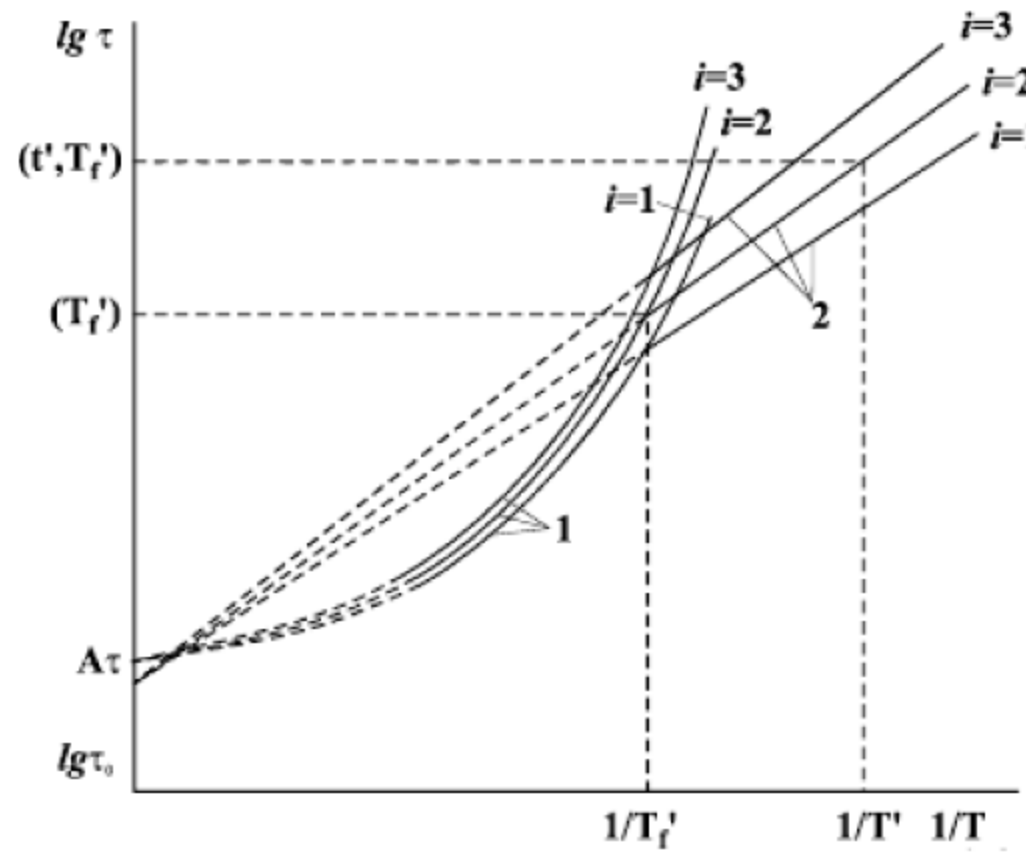


Рис. 2.5. Схематическое изображение температурной зависимости времен структурной релаксации

Таблица 2.2

Оптимальные значения постоянных, использованных при расчете релаксации напряжений в нестабилизированном стекле

Стекло	i	g_i	B_i	$g_{i\sigma}$	$B_{i\sigma}$	$-A_{i\sigma}$	$-\lg \tau_{0i\sigma}$
Si-15 – 1 ($A_\tau = -13.5$, $\lg \tau_0 = -14.7$, $T_{\sigma\tau} = 474$, $T_{\sigma\sigma} = 492$)	1	0,005	4200	0,010	3700	14,60	17,00
	2	0,010	4400	0,020	3900	14,60	17,00
	3	0,025	4600	0,055	4100	14,60	17,00
	4	0,032	4805	0,070	4300	14,60	17,00
	5	0,087	5184	0,107	4600	14,15	17,00
	6	0,209	5414	0,177	4900	14,15	17,00
	7	0,348	5580	0,309	4940	13,68	16,90
	8	0,284	5728	0,252	4940	13,11	15,60

В табл. 2.2 приведены значения постоянных, использованных при расчете релаксации напряжений в исследованном стекле. На рис. 2.5 показано соответствие расчетных (линии) и экспериментальных (точки) зависимостей, характеризующих релаксацию напряжений в исследованных стеклах. Как видно, соответствие является вполне удовлетворительным, несмотря на весьма широкие интервалы струк-

турных и экспериментальных температур, в пределах которых выполнялись измерения. Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная модель адекватно описывает процессы релаксации напряжений в нестабилизированных стеклах и может быть использована при решении разнообразных научных и практических задач.

Наиболее примечательным является тот факт, что для исследованных типов многокомпонентных стекол, несмотря на существенное различие в их составах, значения отдельных, наиболее характерных постоянных оказались очень близкими. Как следует из теорий Френкеля [40], любая температурная зависимость вязкости при $1/T \rightarrow 0$ должна стремиться к пределу, равному величине полупериода тепловых колебаний связей между атомами, составляющими структуру. Известно [41], что для связей кремний-кислород эта величина $\sim 3 \cdot 10^{-14}$ с. Таким образом, значения A_τ для всех стекол серии Si-15 практически идеально соответствуют теориям [40]. Значения $\lg \tau_0$ оказываются на один-полтора порядка меньше величины теоретического значения. Хотя эта разница и невелика, но наблюдается во всех без исключения случаях. Причина этой разницы связана с проявлением вторичной структурной релаксации в условиях $T_f = \text{const}$ [41,42].

Существует и другая характерная для всех исследованных стекол особенность: абсолютные значения A_τ и $\lg \tau_0$ для релаксации напряжений превышают во всех случаях соответствующие значения для релаксации структуры, причем различие между A_τ и $\lg \tau_0$ сохраняет тот же знак, что и для релаксации структуры [43].

2.3. Метод расчета напряжений в несимметричных спаях стекла с упругим материалом

Значение разработки методов расчета напряжений в спаях стекол с металлами, керамикой и другими материалами для практических целей известно [44,45]. В настоящем подразделе приведен алгоритм расчета напряжений и деформаций в плоском несимметричном спае, температура которого изменяется во времени, и результаты расчетов по предложенному алгоритму сопоставлены с экспериментальными данными.

Здесь рассмотрены спаи, для которых отношение ширины к

длине не превышает

0,2, а отношение сум-

марной толщины к

длине – 0,05. В этом

случае, как показывает

анализ [46], можно

пренебречь краевыми

напряжениями и вы-

брать в качестве моде-

ли рассматриваемой

системы многослой-

ную полосу. Рассмотрим

напряжения и де-

формации в полосе

(рис. 2.6), состоящей

из m жестко соединен-

ных (без проскальзы-

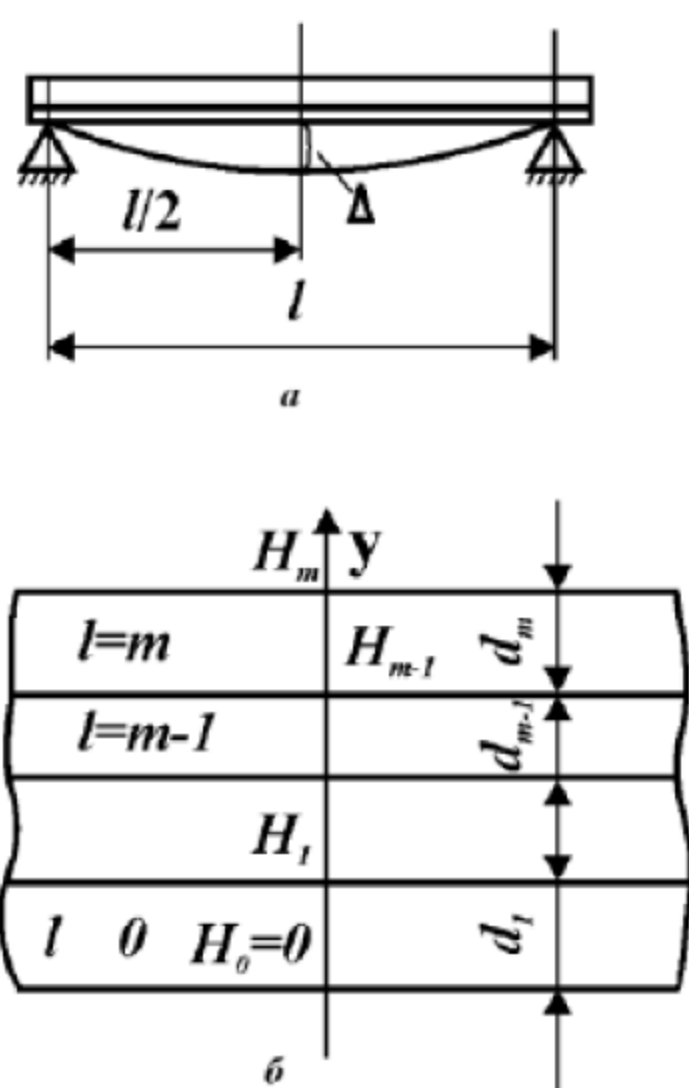


Рис. 2.6. Схема образца спая, поясняющая смысл введенных обозначений

вания) слоев, физические характеристики которых в общем случае различны (рис. 2.6,б). При изменении температуры напряженно-деформированное состояние полосы изменяется довольно сложным образом. Алгоритм расчета, как и в случае «сэндвичевого» спая, держит две части: 1) расчет изменения свободной длины стеклянных компонентов спая в результате структурной релаксации; 2) вычисление напряжений по свободным размерам слоев.

Напряжения, возникающие в l -м слое (рис. 2.6,б) многослойной полосы в момент времени $t_k = k\Delta t$, могут быть представлены в виде

$$\sigma_{lk}(y) = E_l^* [L_{lk}^r(y) - L_{lk}^f(y)], \quad (2.47)$$

где $E_l^* = E_l / (1 - \nu_l)$, а E_l и ν_l – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона данного слоя l , $L_{lk}^f(y)$ – его свободная длина, а $L_{lk}^r(y)$ – фактическая длина слоя, причем

$$L_{lk}^r(y) = A_l + B_l \left(y - \left| \sum_{j=1}^n d_j + \frac{d_j}{2} \right| \right), \quad (2.48)$$

где A_l и B_l определяются из условий совместности деформаций на границах слоев, а смысл d_j поясняет рис. 2.6,б:

$$B_l = B; A_l = A; A_l = A + B \sum_{j=1}^{l-1} \left(\frac{d_j + d_{j+1}}{2} \right). \quad (2.49)$$

Определение коэффициентов A и B сводилось к решению системы двух линейных уравнений, которые получались из условий равенства нулю продольной силы и изгибающего момента в поперечном сечении полосы:

$$\sum_{i=1}^m \int_{H_{i-1}}^{H_i} \sigma_{lk}(y) dy = 0, \quad (2.50)$$

$$\sum_{i=1}^m \int_{H_{i-1}}^{H_i} \sigma_{lk}(y) y dy = 0, \quad (2.51)$$

где $H_0=0$, $H_l = \sum_{j=1}^l d_j$, $l = 1, 2, \dots, m$ (см. рис. 2.6,б).

При линейном изменении свободной длины $L_{lk}^f(y)$ по толщине l -го слоя функция напряжений $\sigma_{lk}(y)$ также линейна.

Изменение свободной длины стеклянного слоя рассчитывалось аналогично [37]:

$$\Delta L_{lk}^f(y) = \frac{\sigma_{lk}(y)}{E_l^*} \left[1 - \sum_{i=1}^n g_i \exp\left(-\frac{\Delta t_k}{\tau_i}\right) \right], \quad (2.52)$$

а для упругого слоя $\Delta L_{lk}^f(y) = 0$.

Дилатометрическое изменение длины постоянно по высоте каждого слоя, поэтому функции $\sigma_{lk}(y)$, $\Delta L_{lk}^f(y)$ и $L_{lk}^f(y)$ линейны и определялись своими значениями на границах l -го слоя. Таким образом, для характеристики напряженно-деформированного состояния полосы достаточно было рассмотреть релаксацию напряжений на верхней и нижней границах слоя. При этом соотношения (2.50) и (2.51) преобразовались к виду

$$\sigma_{lkj} = E_l^* \left[A_l - (-1)^j B \frac{d_l}{2} - L_{lkj}^f + 1 \right], \quad (2.53)$$

$$\Delta L_{lkj}^f = \frac{\sigma_{lkj}}{E_l^*} \left[1 - \sum_{i=1}^n g_i \exp\left(-\frac{\Delta t_k}{\tau_i}\right) \right], \quad (2.54)$$

где индексом j отмечены верхняя ($j = 1$) и нижняя ($j = 2$) границы слоя.

Использование соотношений (2.53) и (2.54) позволило значительно сократить объем вычислений. Определение прогиба образца (см. схему на рис. 2.6,а) производилось по разности напряжений на границах упругого слоя наибольшей толщины:

$$\Delta = \frac{L^2}{8E_1^*d_1} \sigma_{lk2} - \sigma_{lk1} . \quad (2.55)$$

Выяснилось, что на этапе расчета релаксации напряжений в несимметричном спае величина шага по времени должна быть в общем случае значительно меньше, чем в случае «сэндвичевого» спая.

Для экспериментальной проверки расчета были проведены измерения прогибов двухслойного спая стекла Si-15 – 1 ($d_{ст} = 1,51$ мм) с ферритом ($d_{сег} = 0,30$ мм) по методике, описанной в [39]. Нанесенные на рис. 2.7 экспериментальные точки представляют собой средние данные по результатам шести независимых серий измерений.

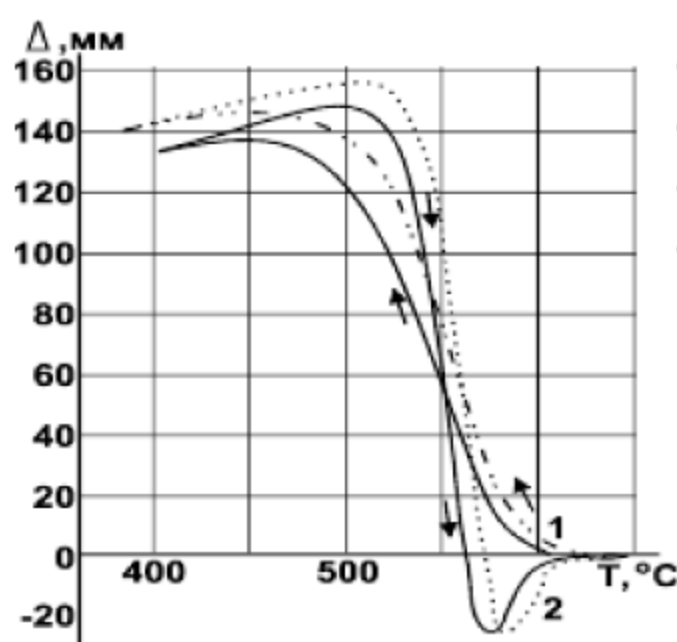


Рис. 2.7. Расчетная (линии) и экспериментальная (точки) температурные зависимости стрелы прогиба двухслойного спая стекла и феррита при охлаждении (1) и нагревании (2) со скоростью 3 К/мин

Предложенный метод расчета напряжений и деформации несимметричного спая, содержащего, по крайней мере, один стеклянный компонент, был применен для решения широкого круга практических задач, связанных с вычислением напряжений в покрытиях и спаях как однофазных, так и композиционных.

2.3.1. Расчет напряжений в спаях стекла со стеклом

На основе теории отжига спаев были разработаны алгоритм и программа расчета напряжений в спае стекла с упругим телом. При большой разнице в вязкостях спаиваемых стекол (более трех-четырех порядков) алгоритм работы может быть применен и для расчета напряжений в спаях стекла со стеклом.

Ниже приводятся алгоритм расчета напряжений в «сэндвичевом» спае “стекло-стекло” и результаты сопоставления расчетов, выполненных на основе этого алгоритма с экспериментальными данными (стекло $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O-RO}$ и $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$), приведенными в табл. 2.3.

Сначала для заданного режима изменения температуры спая при выбранной длине шага по времени рассчитывались временные изменения вязкости того и другого стекла вне спая. Затем на каждом шаге рассчитывались изменения напряжений в спае, связанные как с различием приращений длин компонентов спая на данном шаге, так и с результатами релаксации ранее возникших напряжений.

Температурные зависимости вязкости стекла для условий как метастабильной (e), так и замороженной (g) структур были приняты линейными в координатах ($\lg \eta - 1/T$), т. е. соответствующие температурные коэффициенты вязкости $B_{\eta e} = d(\lg \eta)/d(1/T)$ и $B_{\eta g} = d(\lg \eta)/d(1/T)$ постоянны. Поскольку разработанные стекла, как правило, содержат много компонентов, при расчетах было принято равенство постоянных, характеризующих условия релаксационных изменений разных свойств одного и того же стекла. Расчет релаксационных изменений свойств выполнялся следующим образом.

Для каждого шага по времени [39]:

$$\xi_k = \xi_{k+1} + \frac{\Delta t_k \eta_r}{10^{1,5 \lg \eta_{k-1} - 0,5 \lg \eta_{k-2}}}, \quad (2.56)$$

$$T_{fk} = T_0 + \sum_{i=1}^n \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{\xi_k - \xi_{i-1}}{\eta_r} \right)^{b_s} \right) \Delta T_i \right], \quad (2.57)$$

$$\lg \eta_k = \lg \eta_0 + \left(\frac{1}{T_{fk}} - \frac{1}{T_0} \right) B_e + \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_{fk}} \right) B_g. \quad (2.58)$$

Здесь ξ_k — величина приведенного времени к концу шага k , η_r — вязкость сравнения, T_{fk} — структурная температура к концу шага k , K_s и b_s — постоянные, описывающие процесс структурной релаксации (подробнее см. подразд. 2.2), T — фактическая температура к концу шага k , Δt_i и ΔT_i — изменения времени и температуры на шаге i , η_0 и T_0 — начальные вязкость и температура эксперимента (при T_0 оба стекла находились в состоянии метастабильного равновесия и напряжения в спале отсутствовали), η_k — вязкость к концу шага k ,

$B_{\eta e}$ и $B_{\eta g}$ – равновесный и «мгновенный» температурные коэффициенты вязкости.

Уравнение (2.56) позволяло значительно увеличить точность расчета ξ_k , поскольку знаменатель второго члена правой части уравнения приближенно описывает среднее значение вязкости на шаге k . Уравнения (2.57) и (2.58) предусматривали прямую пропорциональность между движущей силой структурной релаксации на шаге k и разностью $(T_{fk} - T_k)$.

Зная T_0 , T_k и T_{fk} , легко определить для данного компонента спая его «дилатометрическую» длину L_k (в начальный момент времени $L_0=1$):

$$L_k = 1 - \frac{T_0 - T_{fk}}{T_0 - T_{fk}} \alpha_e - \frac{T_{fk} - T_k}{T_{fk} - T_k} \alpha_g, \quad (2.59)$$

где α_e и α_g – соответственно равновесный и мгновенный КЛТР.

Обозначив через L_{lk}^f “свободную” длину l -го компонента спая, через L_{lk}^{rel} – его “дилатометрическую” длину, а через ΔL_{lk}^{rel} – суммарное (за k шагов) изменение длины компонента спая, связанное с релаксацией напряжений, получили:

$$L_{lk}^f = L_{lk} - \Delta L_{l,k-1}^{rel}. \quad (2.60)$$

Как следует из (2.60), учет влияния релаксации напряжений отстает на один шаг от учета изменения линейных размеров. Это может приводить к дополнительной ошибке. Чтобы уменьшить эту ошибку до уровня, при котором ее влиянием можно было бы пренебречь, при расчете релаксации напряжений существенно (в 3-4 раза) уменьшали длину шагов по времени по сравнению с величиной шага, принимаемой для расчета релаксации структуры.

Таблица 2.3

Свойства стекол, примененных для получения спаев

№ п/п	$-A_\eta$	$B_{\eta e}$	$B_{\eta g}$	b_s	$\lg K_s$	$\alpha_e \cdot 10^7, K^{-1}$	$\alpha_g \cdot 10^7, K^{-1}$	$E/(1-\mu) \cdot 10^4,$ кгс/см ²
1	25,82 + ±0,04	32000	16000+ ±1000	0,65 ±0,05	11,0 ±0,03	350/341)+10 ±10	76/77,7) +2 ±2	85 ±2,5
2	29,94 + ±0,04	36500	17000+ ±1000	0,65 ±0,05	10,65 ±0,03	420 ±10	83 ±2	85 ±2,5

Фактическая длина компонентов спая (одинаковая для обоих компонентов) L_k^r рассчитывалось по уравнению

$$L_k^r = \frac{\sum_{l=1}^2 L_{lk}^f E_l d_l}{\sum_{l=1}^2 E_l d_l}, \quad (2.61)$$

где E_l – модель упругости, а d_l – толщина компонента l (если пластинок из данного стекла две, в качестве d_l берется сумма их толщин).

Изменение напряжений в компоненте спая на шаге k определялось степенью несоответствия изменений его «дилатометрической» и фактической длин на этом шаге:

$$\Delta \Delta L_{lk} = (L_{lk} - L_k^r) - (L_{l,k-1} - L_{k-1}^r). \quad (2.62)$$

Для расчета $\Delta L_{lk}^{\text{rel}}$ принималась функция, предложенная в [45], с постоянными, взятыми из [45]:

$$\Delta L_{lk}^{\text{rel}} = \sum_{i=1}^{k-1} \left[1 - \exp \left(- \sqrt{\frac{|\xi_{lk} - \xi_{li}| \cdot 10^{11.45}}{\eta_r}} \right) \right] \Delta \Delta L_{l,i+1}. \quad (2.63)$$

И, наконец,

$$\sigma_{lk} = \frac{E_l}{1-\nu_l} L_k^r - L_{lk}^f, \quad (2.64)$$

где σ_{lk} – напряжения на шаге k в компоненте l , ν_l – коэффициент Пуассона соответствующего компонента спая.

Стоит отметить, что описанный алгоритм более универсален, и с его помощью можно рассчитывать напряжения и в спаях стекла с упругим телом (приняв, например, для второго компонента $\lg \eta_0 > 20$).

Проверка программы была выполнена для спая стекол следующих составов (мол.% по синтезу):

50SiO₂, 22B₂O₃, 6Na₂O, 6K₂O, 6Li₂O, 10CaO и 80PbO, 10B₂O₃, 10ZnO.

Изготовление образцов производилось путем спекания плоскопараллельных полированных плоскостей стеклянных пластинок при 670 °С в течение 30 мин. Погрешность определения температуры составляла ± 5 К, а напряжений ± 2 кГс/см². На рис. 2.8 приведены экспериментальные значения и рассчитанные поляриметрические кривые для нескольких из изученных режимов. Постоянные для выполненных расчетов подбирались по принципу наилучшего соответствия расчета эксперименту (рис. 2.8). Соответствующие значения были использованы для расчета четырех сложных температурно-временных режимов (рис. 2.8). Соответствие расчета и эксперимента и для таких режимов оказалось вполне удовлетворительным, что свидетельствует о правильности допущений, принятых при разработке алгоритма.

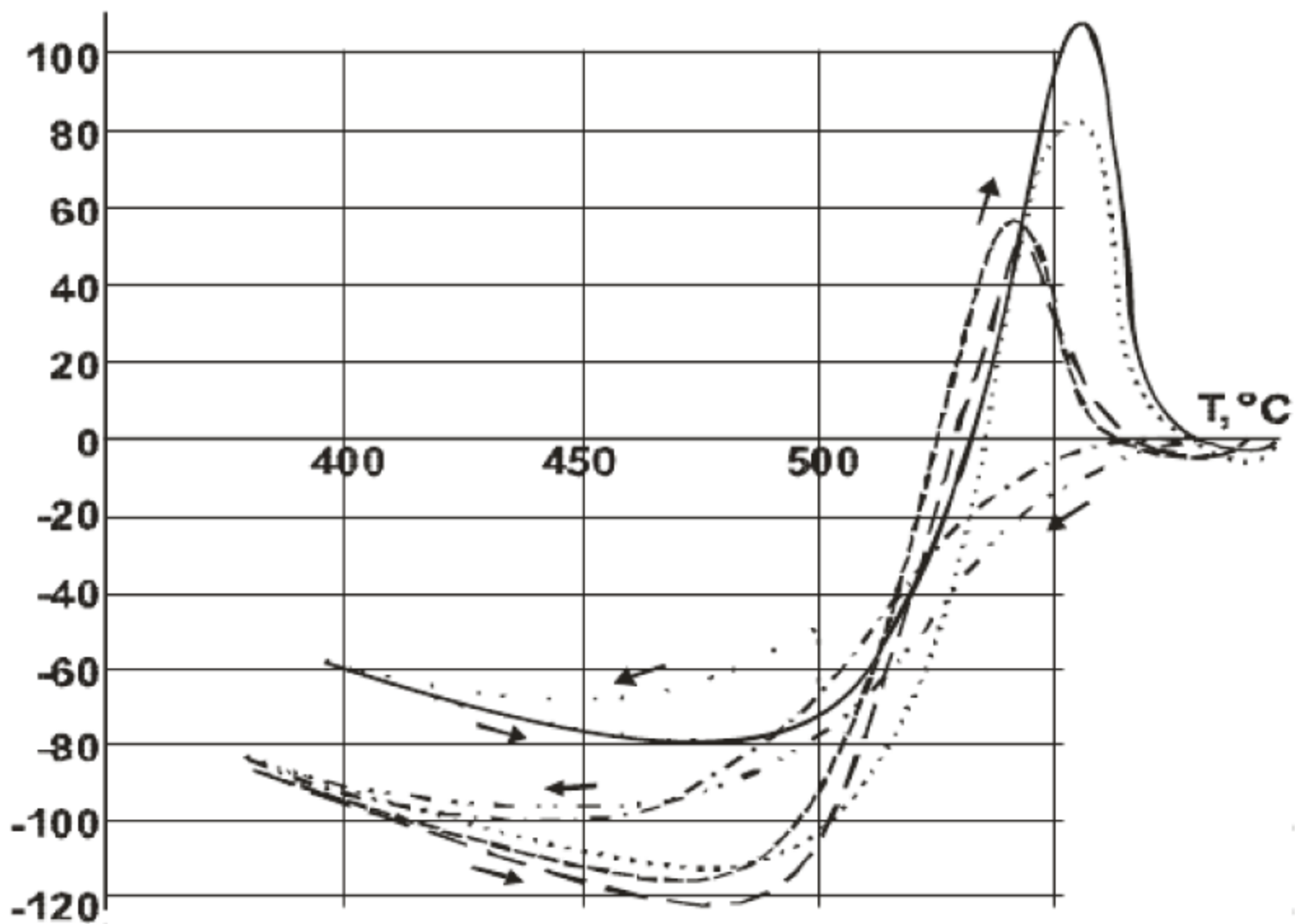


Рис. 2.8. Температурные зависимости напряжений в стекле №1 исследованного спая для различных режимов изменения температуры. Расчет с учетом скорректированных значений для α_e и α_g стекла № 1.

Точки – эксперимент, кривые – расчет: 1 – охлаждение и нагрев 0,5 К/мин, 2 – охлаждение 0,5 К/мин, нагрев 2 К/мин, 3 – охлаждение 2 К/мин, нагрев 0,5 К/мин, 4 – охлаждение 0,5 К/мин с промежуточной двухчасовой выдержкой при 500 °С, нагрев 4 К/мин

2.4. Исследование напряжений в плоских спаях стекол с ферритами

Для надежной работы многодорожечной магнитной головки, выполненной на основе спая “феррит – стекло”, требуется сведение до минимума напряжений ($\sigma = 20 \div 40 \text{ кг/см}^2$ при $T = 20 \text{ °C}$), возникших в стекле при спаивании с ферритом.

В хорошо отоженных спаях существуют в основном лишь напряжения, обусловленные различными значениями КЛТР. Растяги-

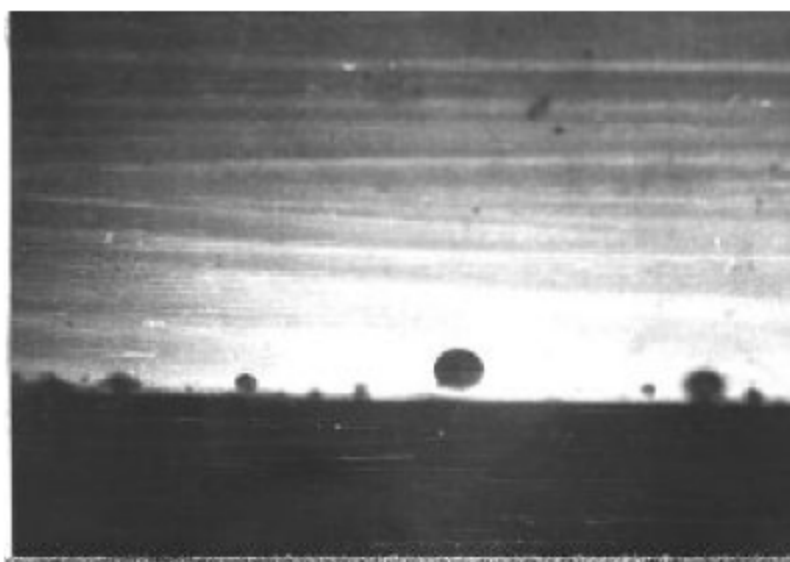
вающее усилие в структуре ММГ может вызвать растрескивание конструкции на последующих этапах механической обработки, нарушение линейности рабочих зазоров или магнитную деградацию используемого ферритового материала.

В качестве объектов исследования использовали стекла системы $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O-RO}$, отвечающие комплексу требований, предъявляемых к стекловидным диэлектрикам для формирования и защиты рабочей поверхности ММГ, и горячепрессованный феррит марки 1000НТ (Ni-Zn). Для формирования спая применяли пластины стекла и феррита размером $5 \times 25 \times 2,5 \text{ мм}^2$. Спаивание производили в графитовой форме по следующему режиму: подъем температуры до 900°C со скоростью 10 град/мин, выдержка при этой температуре 10 минут и охлаждение спая со скоростью 10 град/мин. На рис. 2.9 представлен внешний вид спаев при стократном увеличении наиболее характерных участков. Анализ результатов (рис.2.9) показывает, что:

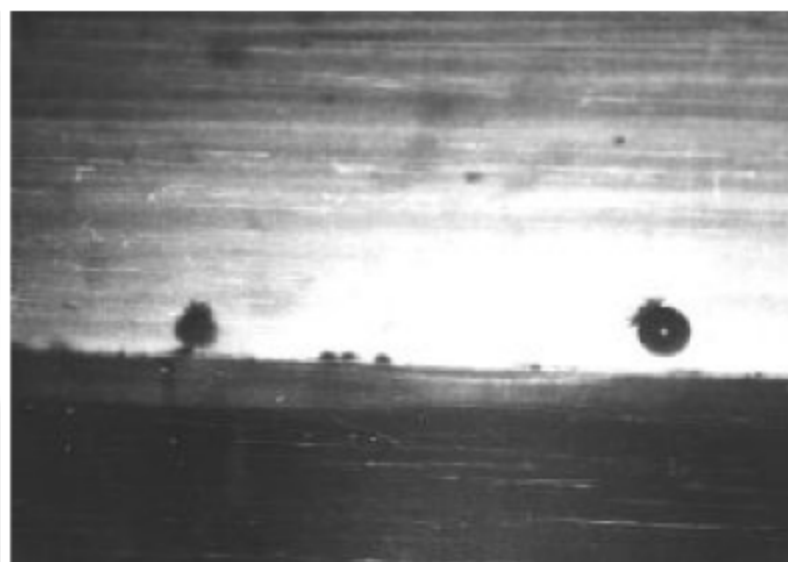
- в спаях феррита 1000НТ со стеклами Si-9-18, Si-9-18-2, Si-9-11-3 наблюдаются воздушные включения, которые в дальнейшем могут обуславливать появление трещин на стекле;

- спай феррита 1000НТ со стеклом Si-9-18-4 отличается от других наиболее четкой границей спая;

- в спае феррита 1000НТ со стеклом Si-9-18 наблюдается значительное количество трещин, возникающих из-за различия в величинах КЛТР спаиваемых материалов (КЛТР Ni-Zn ГПФ 1080НТ составляет приблизительно $8,8 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$).



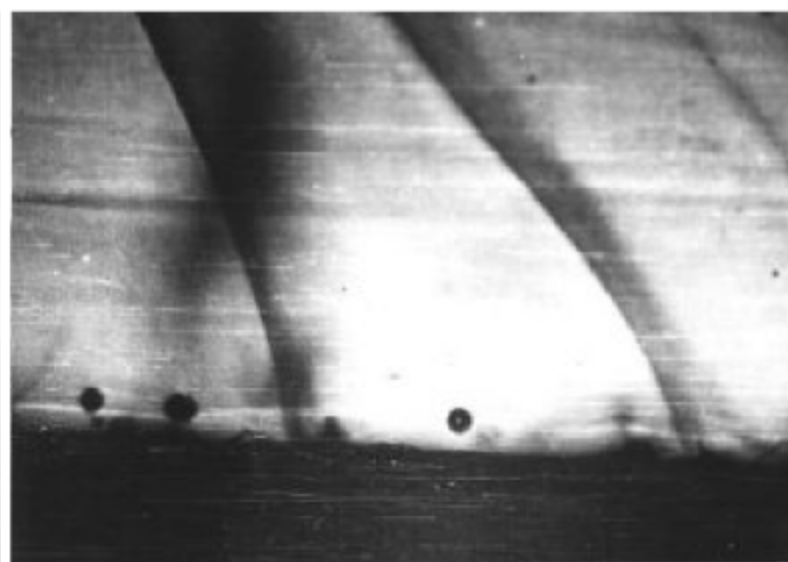
а – Si-9-11-3



б – Si-9-18-2



в – Si-9-18-4



г – Si-9-18

Рис. 2.9. Поперечные шлифы спая стекла с ферритом 1000НТ (100×)

На границе двух спаянных материалов (стекло и феррит) напряжение растяжения всегда должно возникать в материале с большим КЛТР. Однако из практики известны случаи, когда в материале с большим КЛТР возникают либо напряжения сжатия, либо напряжения растяжения, наконец, спай может не иметь напряжений.

Известно, что до тех пор, пока стекло сохраняет пластичность, несмотря на разницу КЛТР стекла и феррита, напряжение в спае отсутствует. Как только вязкость стекла возрастает настолько, что проявляются его упругие свойства, на границе соединенных материалов начинают возникать напряжения. Определение величины напряжений

в спае производят путем графического сравнения величин изменения КЛТР спаиваемых материалов.

С этой целью проведено графическое сравнение температурных зависимостей относительного удлинения Ni-Zn-феррита 1000НТ, стекла ТУ 21-23-19-71, стекла Si-9-18-4 и стекла Si-9-15-1 (значительно различающихся по величине КЛТР). Для определения характера напряжений (в соответствии с указанным методом) [47] кривая расширения феррита (α_{ϕ}) сдвигается так, чтобы она проходила через точку T_s на кривой расширения стекла α_c (рис. 2.10 и 2.11). Температура T_s соответствует температуре, при которой начинают возникать напряжения. Расстояние по вертикали между кривыми α_c и α_{ϕ} определяет величину напряжений, а так как кривая α_{ϕ} выше кривой α_c , то в стекле возникают напряжения растяжения, что обуславливает напряженный режим работы стекла.

Анализ данных, представленных на рис. 2.10 и 2.11, показывает, что для спая стекла ТУ-28-23-19-71 и Ni-Zn-феррита 1000НТ разница величин КЛТР составляет: для интервала температур 20 – 560 °С – $2 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$; для спая стекла Si-9-18-4 – $0,2 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$; для спая Si-9-15-1 – $3 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Соответственно этим значениям Δl расчетные значения напряжения следующие: 80 кг/см², 10 – 20 кг/см², 115 кг/см². Расчет приведенных выше величин напряжений в спае проводился по формуле [47]

$$\sigma = \frac{E_c \Delta l / \Delta t}{(1 - \mu) \left(\frac{d_c E_c}{d_{\phi} E_{\phi}} + 1 \right)}, \quad (2.65)$$

где σ – величина напряжений; E_c и E_ϕ – модули упругости стекла и феррита кг/см²; μ – коэффициент Пуассона; d_c и d_ϕ – толщины стеклянных и ферритовых пластин.

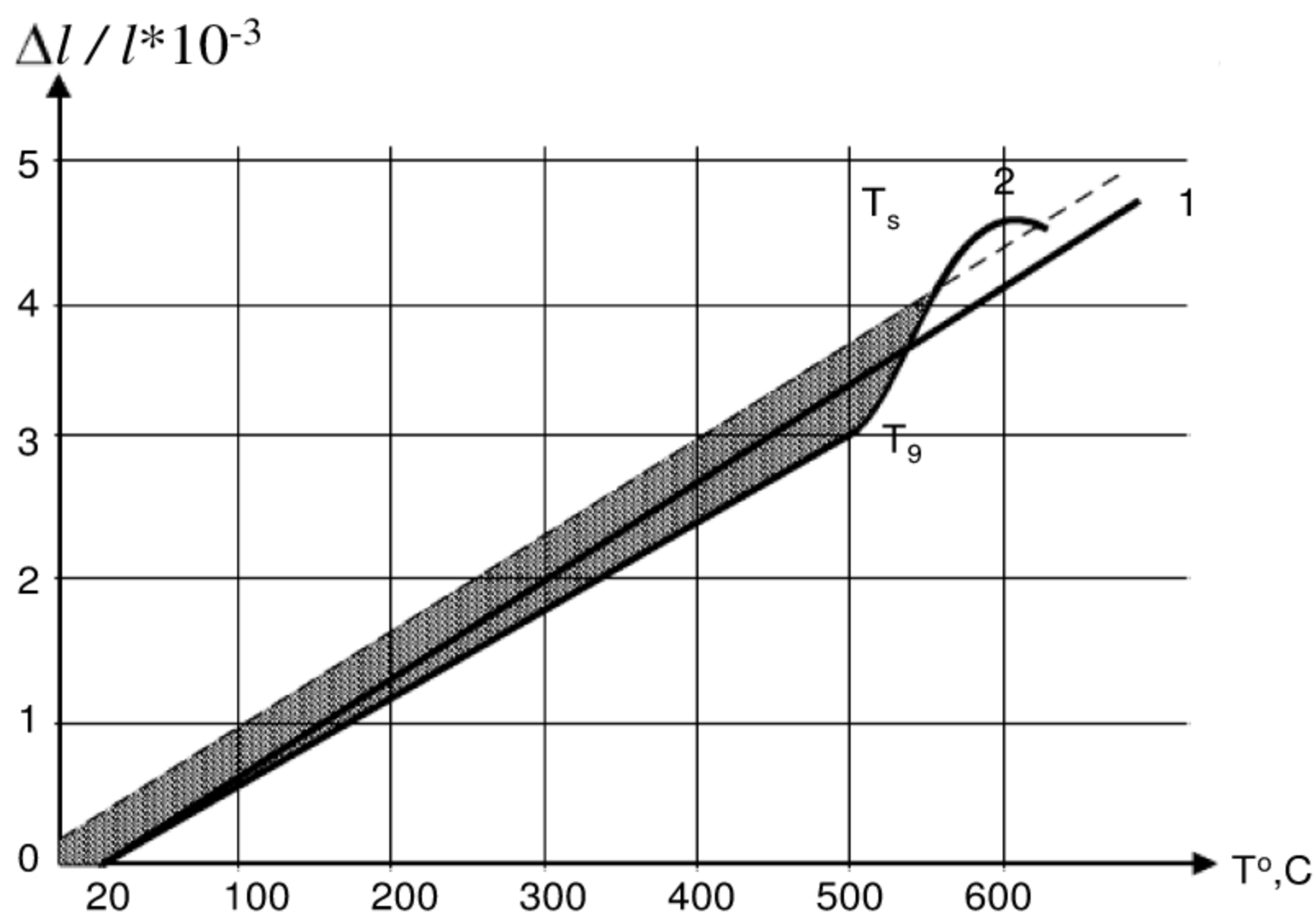


Рис. 2.10. Температурная зависимость относительного удлинения стекла ТУ 21-23-19-71 (кривая 1) и Ni-Zn-феррита 1000НТ (кривая 2)

Однако определение согласованности спаев путем согласованности «дилатометрических» кривых оказалось недостаточным по следующим причинам:

1) пределы погрешности прибора ДКВ-2 составляют $1 - 2 \cdot 10^{-7}$ $1/^\circ\text{C}$, что обуславливает изменение величины напряжений на 20 – 40 кг/см² и существенно влияет на точность оценки напряжений в спае;

2) данный метод не позволяет осуществлять выбор технологического режима формирования спая.

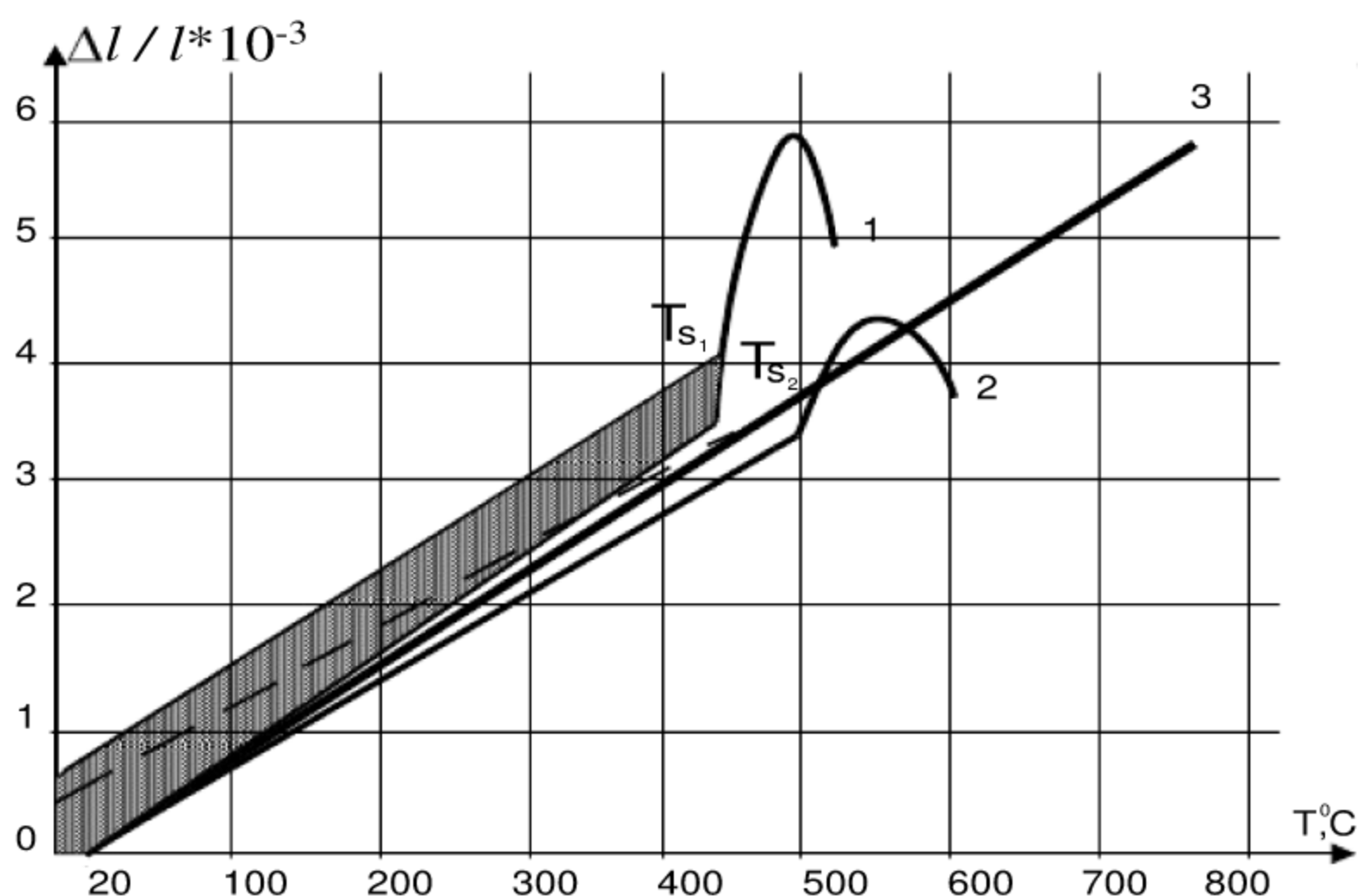


Рис. 2.11. Температурная зависимость относительного удлинения:

стекло Si 9-15-1 – кривая 1;

стекло Si 9-19-4 – кривая 2;

феррит 1000НТ – кривая 3

Для изучения влияния технологических режимов на величины напряжений спаев был использован поляризационно-оптический метод определения напряжений (нагревательный поляриметр – прибор ПКС-125 со встроенной трубчатой печью). Поляризационно-оптический метод дает большую точность измерения, так как является дифференциальным методом [47].

Расчет напряжений в спае определялся по формуле

$$\sigma = \frac{3(\varphi - \varphi_0)}{l \cdot C}, \quad (2.66)$$

где σ – напряжение в спае, кг/см²; φ_0 – положение анализатора при установке его "на темноту"; φ – положение анализатора при максимальном затемнении на границе спая, °С; l – длина образца в направлении просмотра, см; C – фотоупругая постоянная стекла, см²/кг ($C = 3,2$ см²/кг для стекла системы SiO₂-B₂O₃-R₂O-RO).

Проведенные исследования величин напряжений в спае феррита 1000НТ и стекла ТУ 21-23-19-71, а также стекол серии Si-9 (характерные кривые $\sigma = f(T, ^\circ\text{C})$ представлены на рис. 2.12 и получены в режиме охлаждения) показали, что:

- стекла серии Si-9 обеспечивают меньшие величины напряжений в спае по сравнению со стеклом ТУ 21-23-19-71;
- характер зависимости напряжений от температуры для всех стекол существенно не изменяется;
- максимальные величины характерны для интервала температур 320 – 360 °С. Напряжение не увеличивается при температурах более 360 °С в связи с началом релаксации напряжений.

С целью исследования влияния КЛТР стекол на величины напряжений в спае был выбран ряд стекол серии Si-9, различающихся величинами КЛТР (α) в диапазоне $93 \cdot 10^{-7} - 83 \cdot 10^{-7}$ 1/°С и $\Delta\alpha$ при температуре T_s в диапазоне $(3,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-7}$ 1/°С. Формирование спаев проводили в режиме, аналогичном режимам предыдущих экспериментов. Полученные результаты представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Влияние КЛТР стекол на величины напряжений в спае

Материал	КЛТР $10^7 \cdot 1/^\circ\text{C}$	Δl при $T_s = 10^7 1/^\circ\text{C}$	Напряжения (кг/см ²) при $T = 20^\circ\text{C}$
Si 9-15-4	93	3,1	160
Si 9-18-2	90	2,6	110
Si 9-18-3	89	2,2	85
Si 9-15-6	87	1,0	52
Si 9-18-4	86	0,2	25
Феррит 1000НТ	88		

Анализ данных показывает, что:

– величины напряжений в спаях соответствуют разности величин КЛТР ($\Delta\alpha$) при температуре трансформации стекла. При этом чем меньше величина $\Delta\alpha$ (стекла Si-9-18-4), тем меньше величина напряжения в спае. Полученные данные согласуются с данными работы [48];

– снижение величины КЛТР относительно феррита в пределах 3-5 % обуславливает снижение напряжений в спае. Увеличение разности КЛТР более чем на 3% обуславливает рост напряжений в спае (стекло Si 9-18 5).

Величина напряжений в спае может быть снижена [47] при помощи различных технологических приемов формирования спая (скорость охлаждения спая, изотермическая выдержка и т. п.). Исследование зависимости величины напряжений в спае при различных скоростях охлаждения (рис. 2.13) показало, что функция $\sigma = f(T^\circ\text{C})$ име-

ет нулевое значение при температуре релаксации стекла (560 °С), затем величина напряжений в интервале температур (560 – 320 °С) резко увеличивается, достигая при температуре 320 °С своего максимального значения. В интервале температур от 300 до 25 °С наблюдается постепенное снижение величины напряжений. С уменьшением скорости охлаждения от 5 до 3 °С/мин величины напряжений при температуре 20 °С уменьшаются от 85 до 50 кг/см². Таким образом, уменьшение скорости охлаждения приводит к снижению напряжения в спае на 40 %. Однако величины напряжения все-таки достаточно велики, поэтому для их снижения была введена изотермическая выдержка.

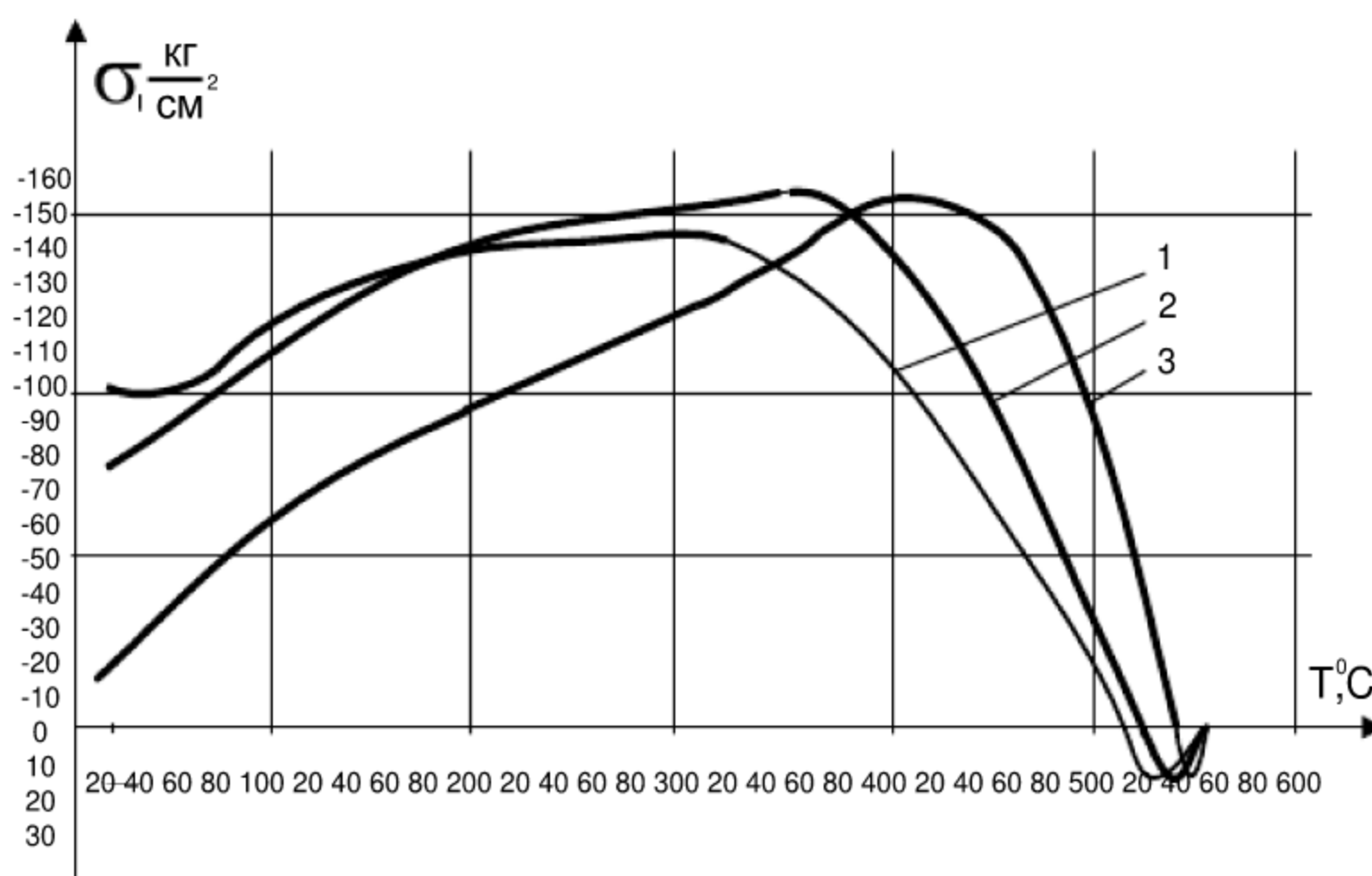


Рис. 2.12. Температурная зависимость напряжений в спае:
 1 – стекло ТУ 21-23-19-71 и феррит 1000НТ;
 2 – стекло Si 9-18-3 и феррит 1000НТ;
 3 – стекло Si 9-18-4 и феррит 1000НТ

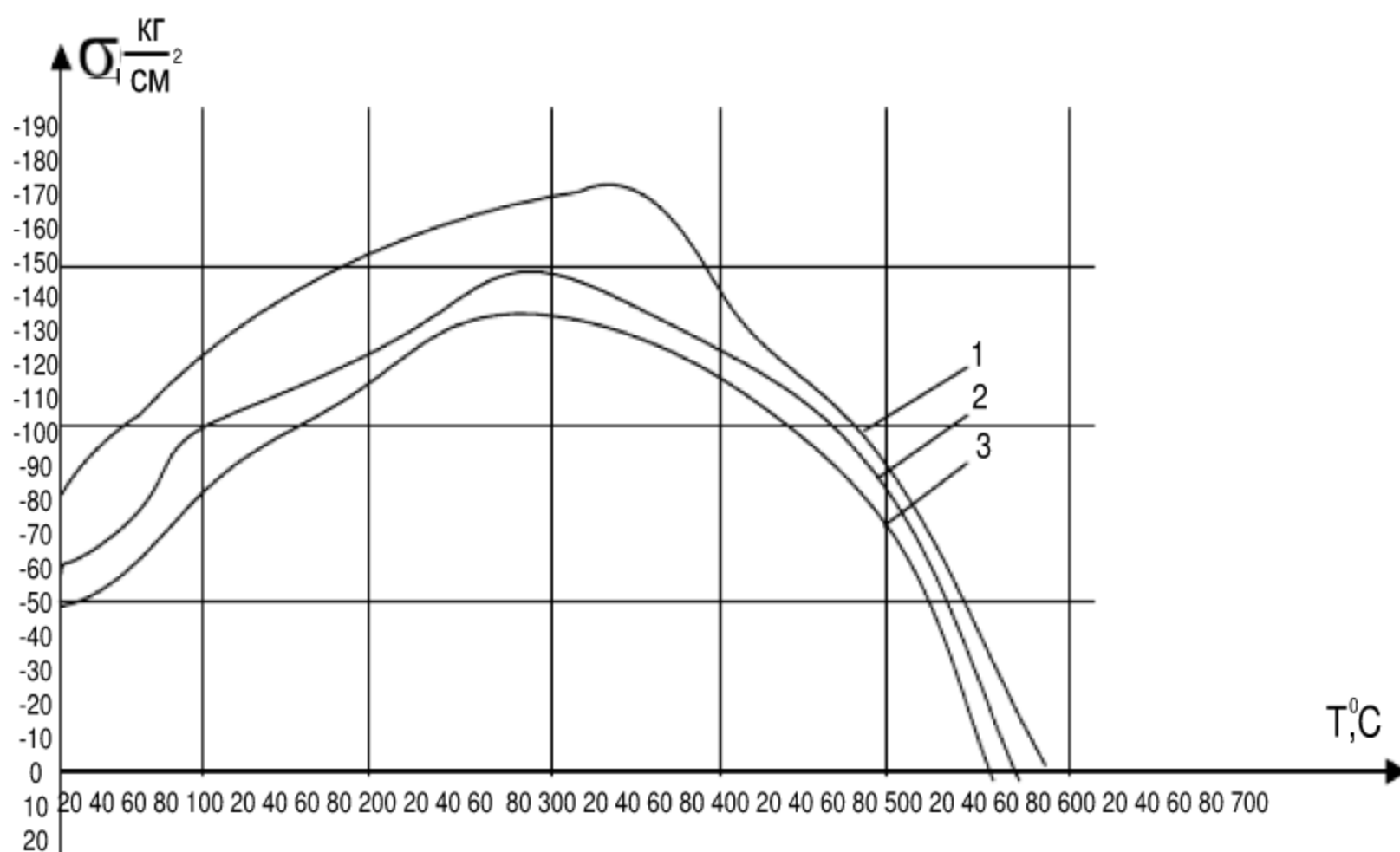


Рис. 2.13. Зависимость величин напряжения в спае (стекло ТУ 21-23-19-71 и феррит 1000НТ) от скорости охлаждения:

- 1 – скорость охлаждения 5 град/мин;
- 2 – скорость охлаждения 3 град/мин;
- 3 – скорость охлаждения 1 град/мин

Известно, что изотермическая выдержка должна осуществляться в зоне температур, где происходит релаксация напряжения. В соответствии с этим диапазон температур для нее был выбран в пределах 530 – 560 °С (интервал варьирования 10 °С). Время изотермической выдержки менялось от 20 до 70 минут с интервалом в 10 минут. Полученные результаты представлены на рис. 2.14. В результате исследования было установлено, что величина напряжений в спае уменьшается при увеличении изотермической выдержки от 20 до 40 минут, а далее остается неизменной, что характерно для всех исследованных температур. В соответствии с этим при формировании спая время изотермической выдержки может быть ограничено 40 минутами.

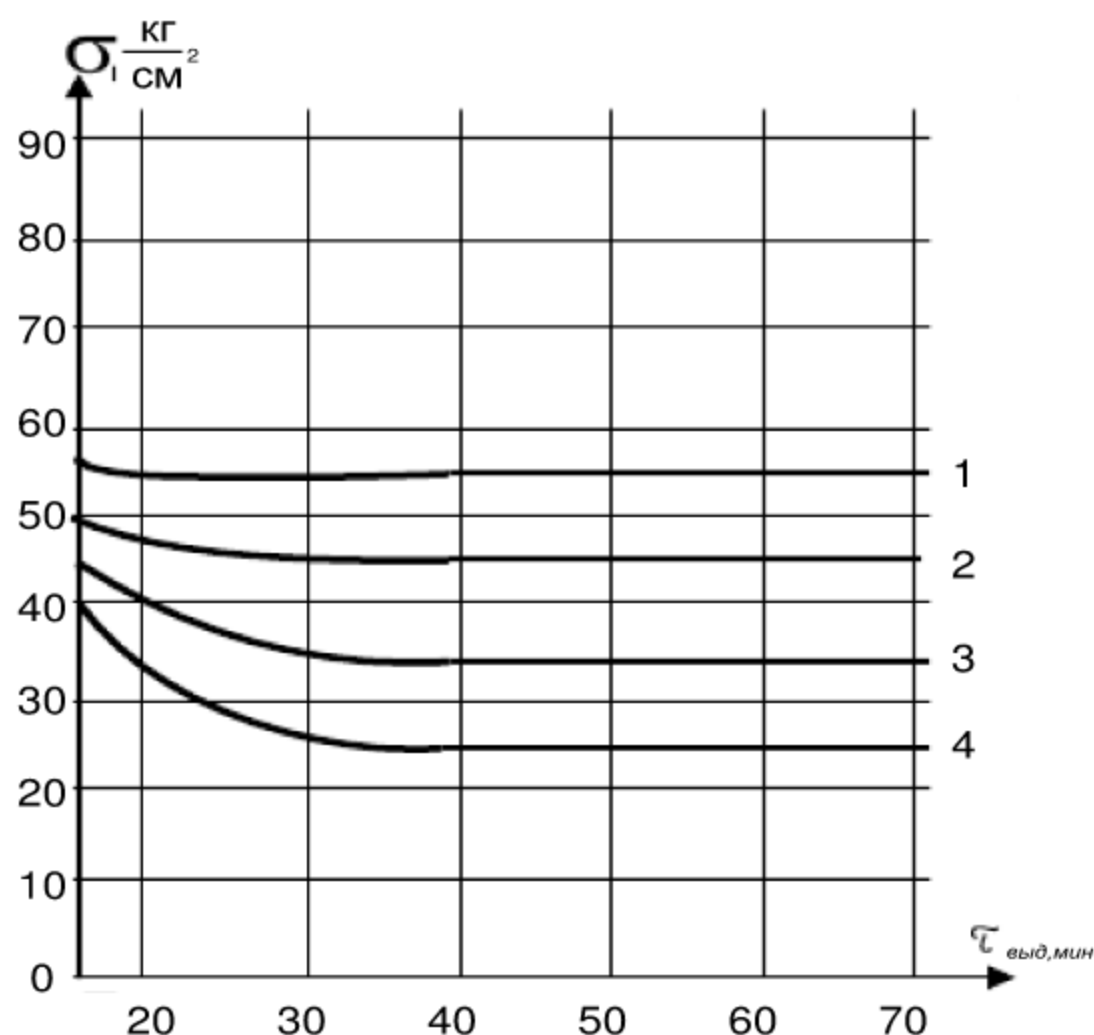


Рис. 2.14. Зависимость величин напряжения в спае (стекло А и феррит 1000НТ) от времени изотермической выдержки:
1 $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 $T = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 $T = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$

Итак, на основании проведенных исследований влияния технологических режимов на величины напряжений в спаях был выбран следующий оптимальный режим получения спая: подъем температуры до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, охлаждение от 900 до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, при температуре $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ изотермическая выдержка в течение 40 мин и последующее охлаждение спая со скоростью $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

В настоящее время разработан и подвергнут экспериментальной проверке метод расчета релаксации структуры стекла, его напряжения и деформации [42]. Как известно, в интервале стеклования развивается структурная релаксация, и все свойства стекла становятся

зависящими не только от температуры T , но и от времени t . Структурная релаксация стекла значительно влияет на напряжения в спае.

Для описания релаксации в стекле часто используется неизотермическое обобщение принципа суперпозиции Больцмана. Например, для релаксации напряжения в стекле при заданных деформации $\varepsilon(t)$ и температуре $T(t)$ имеем [43]:

$$\sigma(t) = \varepsilon(0)E \cdot \exp \left[- \left(\frac{\xi}{\tau_{\delta \text{ref}}} \right)^{b_{\sigma}} \right] + E \int_0^{\xi} \left[- \frac{(\xi - \xi')^{b_{\sigma}}}{\tau_{\delta \text{ref}}} \right] \frac{d\varepsilon}{d\xi} d\xi'; \quad (2.67)$$

$$\xi = \int_0^t \frac{\tau_{\text{ref}}}{\tau_r(t^0)} dt' = \int_0^t \frac{\eta_{\text{ref}}}{\eta(t)} dt', \quad (2.68)$$

где E – модуль упругости; τ_r – время релаксации напряжения при $E = \text{const}$; $\tau_{r,\text{ref}}$ – то же для произвольно выбранной температуры сравнения τ_{ref} ; η_{ref} – вязкость стекла при τ_{ref} ; b_{σ} – эмпирический коэффициент. Запишем уравнение для многокомпонентных однофазных силикатных стекол [42]:

$$b_{\sigma} = 0,5 \lg \tau_{\sigma} = \lg \eta - 11,5, \quad (2.69)$$

где τ – измеряется в секундах, а η – в паузах. Из уравнения (2.69) видно, как изменяется τ_{σ} в данном режиме термообработки $T(t)$, а следовательно, учитывается влияние $T(t)$ на ход релаксационного процесса. Функция $\xi(t)$, с которой надо начинать расчет, определяется изменением вязкости в ходе данной термообработки. Но изменение вязкости в интервале отжига определяется релаксацией структуры стекла. Для расчета структурной релаксации воспользуемся идеей

Нарайанасвами [30], который интерпретировал уравнение Больцмана как метод суммирования откликов системы на серию возбуждений. Уравнение для расчета $\xi(t)$ имеет вид [43]

$$\xi = \sum_{k=1}^n \frac{\eta_{\text{ref}}}{\eta_{k-1}} \Delta t; \quad (2.70)$$

$$\lg \eta_n = \lg \eta_0 + \sum_{k=1}^n \left\{ \Delta \lg \eta_{i,k} + \Delta \lg \eta_{s,k} \left[1 - \exp \left(-\frac{\xi_k - \xi_{k-1}}{\tau \lg \eta_{\text{ref}}} \right)^{b \lg \eta} \right] \right\}, \quad (2.71)$$

где η_n – вязкость после n -го шага во времени; η_0 – вязкость стабилизированного стекла при $t = 0$; $\Delta \lg \eta_i$ и $\Delta \lg \eta_s$ – мгновенное и структурное изменения логарифма вязкости, соответствующие величине температурного скачка ΔT для выбранного шага Δt ($\Delta \lg \eta_s = \Delta \lg \eta - \Delta \lg \eta_i$), где $\Delta \lg \eta$ – изменение вязкости стабилизированного стекла; $\xi_0 = 0$, $\tau \lg \eta_{\text{ref}}$ и $b \lg \eta$ – параметры релаксационной функции $M \lg \eta(t)$ при T_{ref} после температурного скачка $\Delta T \rightarrow 0$. На каждом шаге Δt вначале по уравнению (2.70) рассчитывают ξ_n , а затем по уравнению (2.71) суммируют отклики на всем интервале времени от ξ_0 до ξ_n .

Расчет по уравнениям (2.70) и (2.71) дал $\xi(t)$ для данного режима термообработки. Теперь по уравнению (2.71) рассчитали изменение физического свойства $\lg \eta_n$ в ходе этой термообработки. Для этого в правую часть уравнения (2.71) подставляли y_0 , $\Delta y_{s,k}$ и $\Delta y_{i,k}$ вместо $\lg \eta_0$ и $\Delta \lg \eta$ с соответствующими подстрочными индексами, а также вместо $\tau \lg \eta_{1,\text{ref}}$ и $b \lg \eta$ подставляли $\tau_{y,\text{ref}}$, b_y .

Пусть охлаждение спая в ходе отжига начинается от температуры T_0 , достаточно высокой для того, чтобы все релаксационные процессы завершались практически мгновенно. Возбуждением в этой системе будет разность относительных сжатий стекла и феррита $\varepsilon_g - \varepsilon_\phi$, возникающая на выбранном шаге по времени Δt , а откликом – напряжения в спае. Тогда уравнение, описывающее отжиг спая, можно записать так:

$$\sigma(t) = K \int_0^{\xi} \exp \left[-\frac{(\xi - \xi')}{\tau_{\delta, \text{ref}}^x} \right] \frac{d(\varepsilon_g - \varepsilon_\phi)}{d\xi} d\xi, \quad (2.72)$$

где K – коэффициент, учитывающий форму, размеры спая и упругие характеристики спая; ξ – приведенное время, рассчитанное по уравнениям (2.70) и (2.71); $\varepsilon_g = (\Delta l/l)g$ – величина теплового сжатия стекла в момент ξ' , рассчитанная по уравнению (2.71); ε_ϕ – тепловое сжатие феррита, которое считалось заданным (если задан КЛТР α , то ε_ϕ рас-

считывается по уравнению $\varepsilon_\phi = \int_{T_0}^T \alpha(t) dT$); τ_{δ}^x , b_{δ}^x – параметры

функции релаксации напряжения в данном спае.

Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных (спая стекло Si-9-18-4 – феррит 1000НТ) был произведен расчет напряжений по уравнению (2.72). Функции $\xi(t)$ и $\varepsilon_g(t)$ рассчитаны по уравнениям (2.70) и (2.71).

Определение параметра К

Параметр К рассчитывался по формуле

$$K = \frac{E_g}{(1-\mu) \left(\frac{E_\phi d_\phi}{E_g d_g} + 1 \right)}, \quad (2.73)$$

где E_g , E_ϕ – модули упругости стекла и феррита соответственно;

$E_g = 7,6 \cdot 10^6$ кг/см², $E_\phi = 1,1 \cdot 10^6$ кг/см²; μ – коэффициент Пуассона, принятый для стекла и феррита равным 0,27;

d_g , d_ϕ – толщины стеклянных и ферритовых пластин (0,5 см).

Расчет по уравнению (2.73) с использованием приведенных выше значений дал $K = 1,32 \cdot 10^6$ кг/см².

Определение параметров $\tau_{\sigma ref}$ и b_σ^*

Используя значения параметров (2.73), получили, что отношение жесткостей n равно

$$n = \frac{R_g}{R_\phi} = \frac{E_g d_g}{E_\phi d_\phi} = 6,92. \quad (2.74)$$

С помощью [49] нашли, что для $\lg n = 0,84$

$$b_\delta^* = 0,82; \lg \tau_\delta^* = \lg \tau + 1,15. \quad (2.75)$$

Температура сравнения (произвольно выбранная) $T_{ref} = 600$ °С и $\lg \eta_{ref} = 9,46$. Из уравнения (2.69) получили $\lg \tau_{\delta, ref} = 2,04$, и, наконец, по уравнению (2.75) $\lg \tau_{\delta, ref}^* = -0,89$, т.е. $\tau_\delta^* = 0,129$.

Результат расчета температурной зависимости напряжений показан на рис. 2.15. Расчет согласуется с экспериментом.

При использовании стекловидного диэлектрика (Si-9-18-4) для защиты рабочей поверхности ММГ желательно, чтобы стекло в спае с ферритом работало на сжатие, так как известно, что прочность стекла на сжатие примерно в 15 раз больше, чем на растяжение [47].

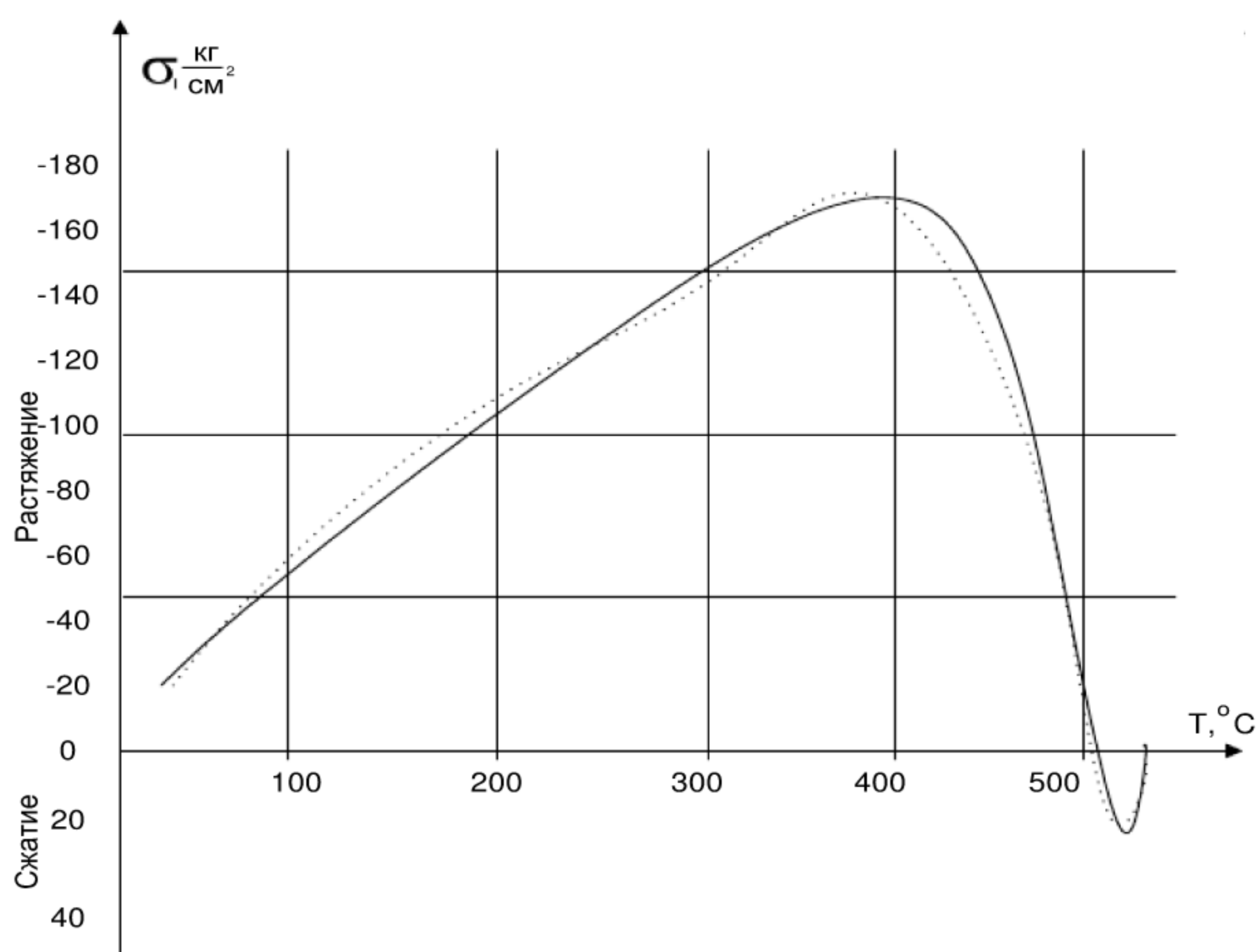


Рис. 2.15. Температурная зависимость напряжений в спае феррит 1000НТ – стекло Si 9-18-4 (сплошная линия – экспериментальные данные, пунктир – расчетные данные)

Для изменения химического состава стекла Si 9-18-4 (добавки MnO_2 от 1 до 8 % весовых сверх 100 %, которые ослабляют диффузию компонентов феррита в стекло) был разработан состав Si-9-18-4-14 (КЛТР $86 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $T_D - 542^\circ$, $t_{\Theta=0} - 970^\circ$, $H - 640 \text{ кг/мм}^2$), "работающий" при $T = 20^\circ\text{C}$ в спае с ферритом на сжатие $\sigma = 43/61 \text{ кг/см}^2$.

Проведенные эксперименты и исследование напряжений при помощи графического сравнения «дилатометрических» кривых стекла и феррита, а также с использованием поляриметрического метода, позволили выбрать оптимальный технологический режим формирования спая, величины напряжений в котором не превышают 20 – 40 кг/см^2 .

Принятая модель для расчета изменений напряжений в спае стекла с ферритом в ходе отжига, описываемая как совокупность процессов изменения физических свойств стекла в ходе релаксации структуры и релаксации напряжений в спае, позволила сравнить экспериментальные и расчетные данные, которые хорошо согласуются с экспериментом.

2.4.1. Исследование механических напряжений в тройных спаях видеоголовки

Конструктивной особенностью видеоголовок типа MIG является использование тройных соединений, состоящих из таких материалов, как феррит, пермаллой и стекловидный диэлектрик. Механические свойства этих материалов оказывают существенное влияние на стабильность электрических и магнитных параметров изготавливаемых видеоголовок. Несоответствие КЛТР, μ , E спаиваемых материалов

приводит к значительным механическим напряжениям, имеющим как растягивающий, так и сжимающий характер. Конфигурация структур также влияет на величину механических напряжений.

Теоретический анализ позволяет более детально изучить распределение напряжений в структурах, в зависимости от их механических свойств и конфигурации. Экспериментальные методы не позволяют определить характер распределения напряжений в тройных структурах, имеющих такие геометрические размеры, какие необходимы для изготовления ВГ ($10^{-7} - 10^{-5}$ м).

При расчете использовалась модель плоского тройного соединения, представляющего набор трех плоских пластин (рис. 2.16).



Рис. 2.16. Модель тройного соединения

В первой части теоретического анализа распределения механических напряжений в данной структуре проводилась оптимизация механических свойств представленных материалов. Изучались распределения напряжений при различных параметрах μ , E , α всех трех материалов. Во второй части исследовались распределения напряжений при оптимизированных механических свойствах с учетом геометрической конфигурации спаиваемых материалов. Проводилась оптимизация конфигурации спаев с целью уменьшения механических напряжений в трехслойной

структуре. Оптимизация механических параметров материалов и конфигурации соединения была тесно связана с технологией и конфигурацией ВГ типа MIG. Исследовались вопросы, связанные с образованием критических напряжений, создаваемых в используемых материалах при несоответствии их механических свойств и конфигурации подложки. Приводимые ниже результаты могут использоваться как руководство к конструированию при достижении приемлемо низких уровней напряжений [50].

Для получения оптимальных механических свойств материалов при расчете напряжений предполагалось, что средние температуры для всех трех слоев были одинаковыми, а также такие параметры, как μ , E , α принимались различными и усреднялись для каждого слоя в отдельности.

Оптимизация механических параметров проводилась для геометрических размеров $h_1 = 1\text{ мм}$, $h_2 = 1\text{ мкм}$, $h_3 = 2\text{ мкм}$ при получении напряжений, компенсирующих друг друга. Изменение механических параметров и КЛТР проводилось в следующих пределах:

- для феррита $E_1 = (5,0 - 11,0) \cdot 10^{10}\text{ Па}$; $\mu_1 = 0,27 - 0,3$;
 $\alpha_1 = (5,0 - 10,2) \cdot 10^{-6}\text{ 1/}^\circ\text{C}$;
- для пермаллоя $E_2 = (8,0 - 13,0) \cdot 10^{10}\text{ Па}$; $\mu_1 = 0,25 - 0,3$;
 $\alpha_2 = (7,8 - 9,0) \cdot 10^{-6}\text{ 1/}^\circ\text{C}$;
- для стекла $E_3 = (6,0 - 9,0) \cdot 10^{10}\text{ Па}$; $\mu_1 = 0,18 - 0,25$;
 $\alpha_3 = (8,0 - 11,2) \cdot 10^{-6}\text{ 1/}^\circ\text{C}$.

При изменении μ_1 заметных изменений σ_1 , σ_2 , σ_3 не наблюдалось. Увеличение μ_2 привело к незначительному уменьшению растя-

гивающего напряжения σ_1 , увеличению растяжения σ_2 и неизменности σ_3 . При увеличении μ_3 наблюдалось растяжение σ_1 и заметное увеличение сжатия σ_3 , при этом σ_2 почти не изменилось.

Увеличение E_1 приводило к незначительному увеличению σ_1 , а σ_2 и σ_3 практически оставались постоянными. На рис. 2.17 представлена зависимость $\sigma = f(E_2)$.

При увеличении E_2 значительно уменьшается σ_1 , напряжение в стеклянном слое остается неизменным, а напряжение в пермаллое имеет сложную зависимость и наблюдается уменьшение при $E_2 = 10^{11}$ Па. При выборе оптимального значения E_3 наблюдается незначительное увеличение растягивающего напряжения в ферритовом слое. Изменений σ_2 не наблюдается. При значении $E_3 = 8 \cdot 10^{10}$ Па достигается минимальное значение σ_3 в стеклянном слое. Таким образом, для дальнейшего изучения распределения напряжений были выбраны такие параметры материалов: $\mu_1 = 0,26$; $\mu_2 = 0,28$; $\mu_3 = 0,21$; $E_1 = 9 \cdot 10^{10}$ Па; $E_2 = 10^{11}$ Па; $E_3 = 8 \cdot 10^{10}$ Па.

Значительное влияние на распределение напряжений в спаях оказывает тепловое несоответствие материалов, выраженное в различии их КЛТР. Проведенный анализ показал, что суммарные минимальные напряжения в трехслойной структуре достигаются при следующих значениях КЛТР: $\alpha_1 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $\alpha_2 = 8,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $\alpha_3 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

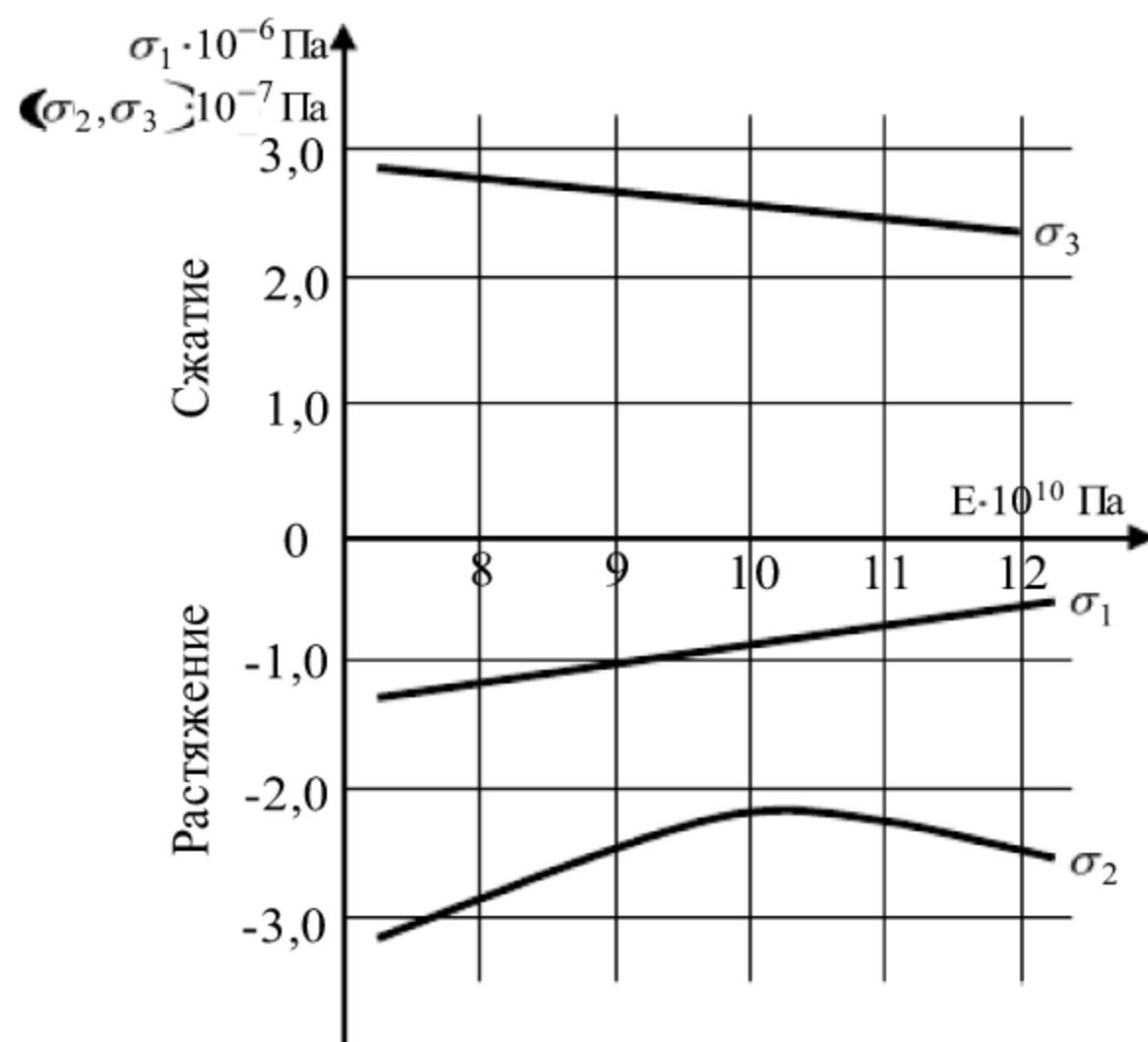


Рис. 2.17. Зависимость напряжений от модуля Юнга:
 σ_1 – феррит; σ_2 – пермаллой; σ_3 – стекло

В дальнейшей работе проводился расчет распределения напряжений в каждом слое в зависимости от толщины пермаллового слоя и толщины стеклянного слоя, при этом толщина ферритового слоя составляла 1,5 мм.

На рис. 2.18 и 2.19 представлены расчеты напряжений в каждом из слоев при изменении толщины пермаллового слоя и при различных h_3 . На рис. 2.18 показано, что при увеличении h_2 сжимающие напряжения в стеклянном слое растут, но при этом уменьшаются растягивающие напряжения в слое пермаллоя.

Увеличение толщины стеклянного слоя приводит к увеличению величины напряжения. При этом значение напряжений в пермаллое растет.

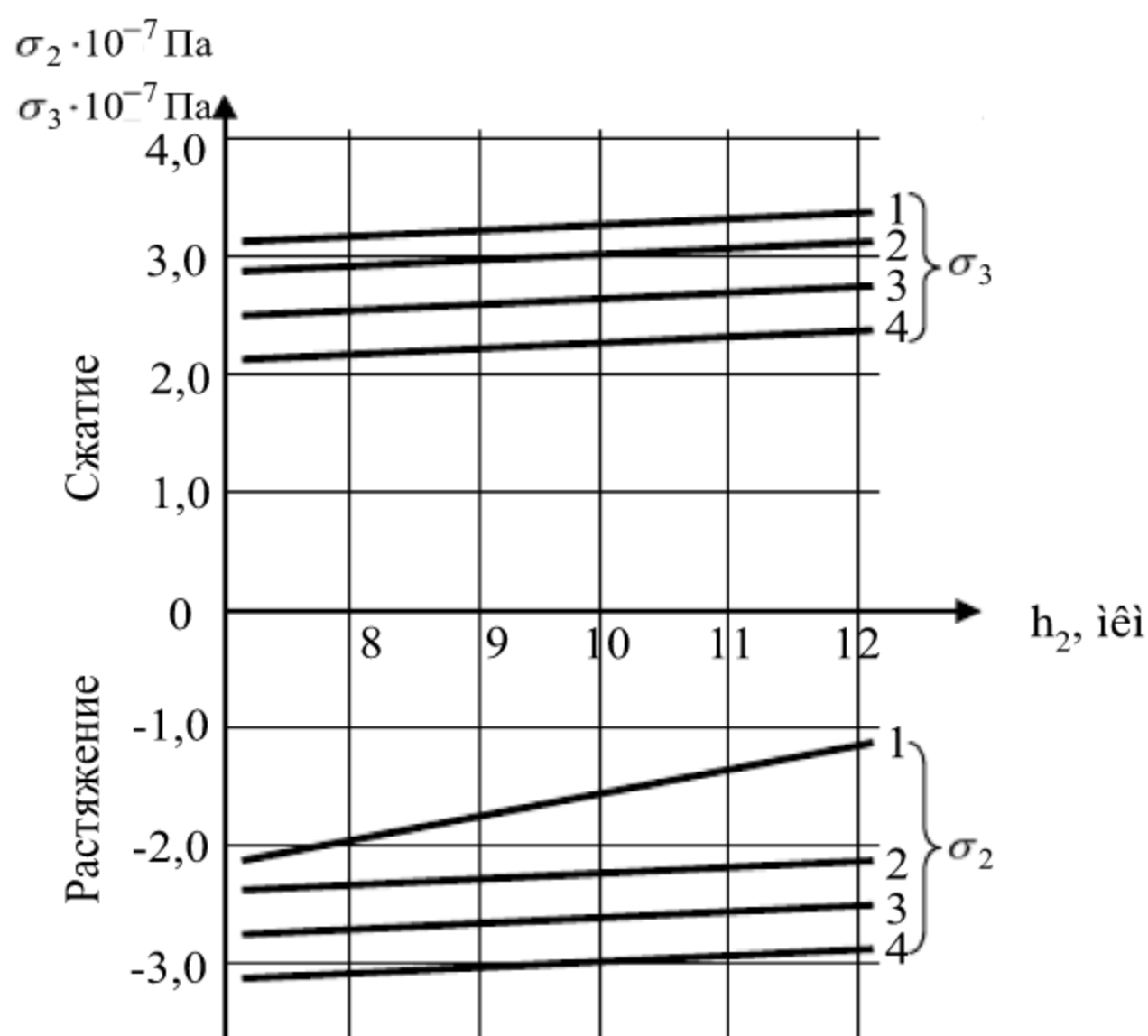


Рис. 2.18. Зависимость напряжений от толщины слоя пермаллоя:
 1 – $h_3 = 0,5$ мкм; 2 – $h_3 = 1$ мкм; 3 – $h_3 = 1,5$ мкм; 4 – $h_3 = 2$ мкм

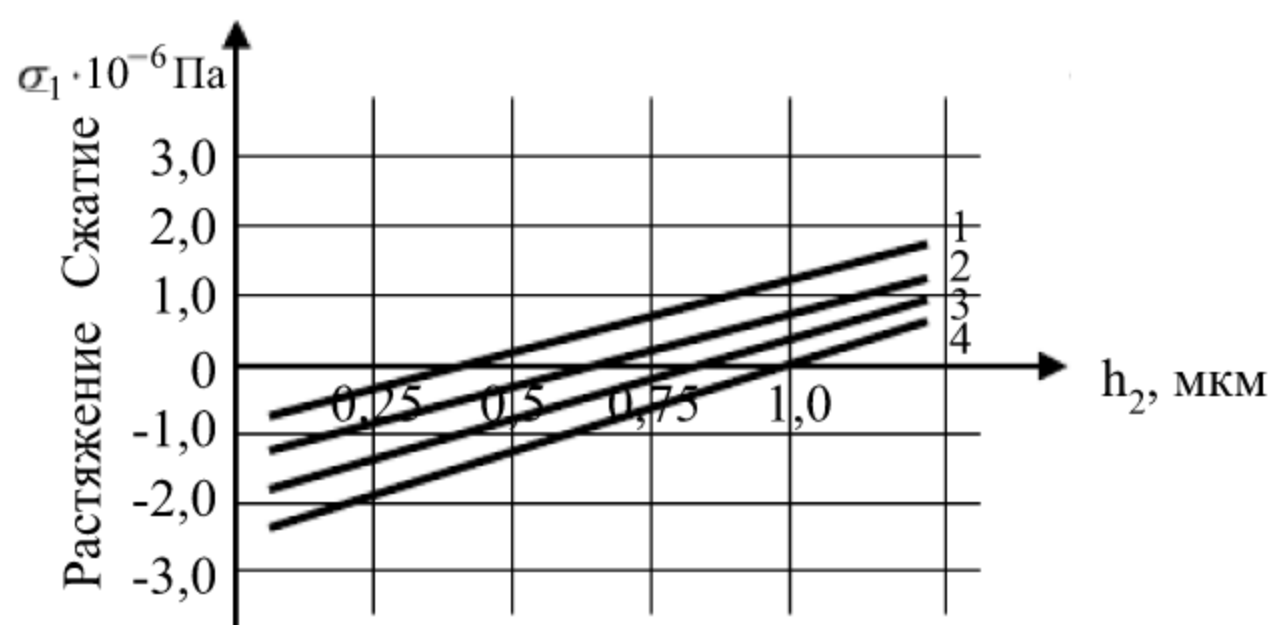


Рис. 2.19. Зависимость напряжений от толщины слоя пермаллоя в
 ферритовом слое:
 1 – $h_3 = 0,5$ мкм; 2 – $h_3 = 1$ мкм; 3 – $h_3 = 1,5$ мкм; 4 – $h_3 = 2$ мкм

На рис. 2.19 показано, что напряжения в ферритовом слое при определенных толщинах h_2 и h_3 становятся не растягивающие, а сжимаю-

щие. Минимальные напряжения в этом случае получаются при $h_2 = 0,5 - 0,75$ мкм и $h_3 = 1,0 - 1,5$ мкм.

На рис. 2.20 показано распределение напряжений в слоях при изменении толщины стеклянного слоя, представлена вся сложность характера зависимости напряжения от многих параметров трехслойного соединения. Из рис. 2.20 видно, что увеличение толщины стеклянного слоя приводит к уменьшению сжимающего напряжения в этом слое, к увеличению растягивающих напряжений в слоях феррита и пермаллоя. При значительном отличии толщин слоев стекла и пермаллоя напряжения в пермаллоеве принимают значения большие, чем в стеклянном слое. Анализ распределения показывает, что толщина пермаллового слоя должна быть меньше, чем стеклянного слоя, при этом сжимающие и растягивающие напряжения становятся примерно равными, а напряжения в ферритовом слое практически исчезают. Следовательно, можно определить такие соотношения толщин, при которых напряжения ослабляются в трехслойном соединении.

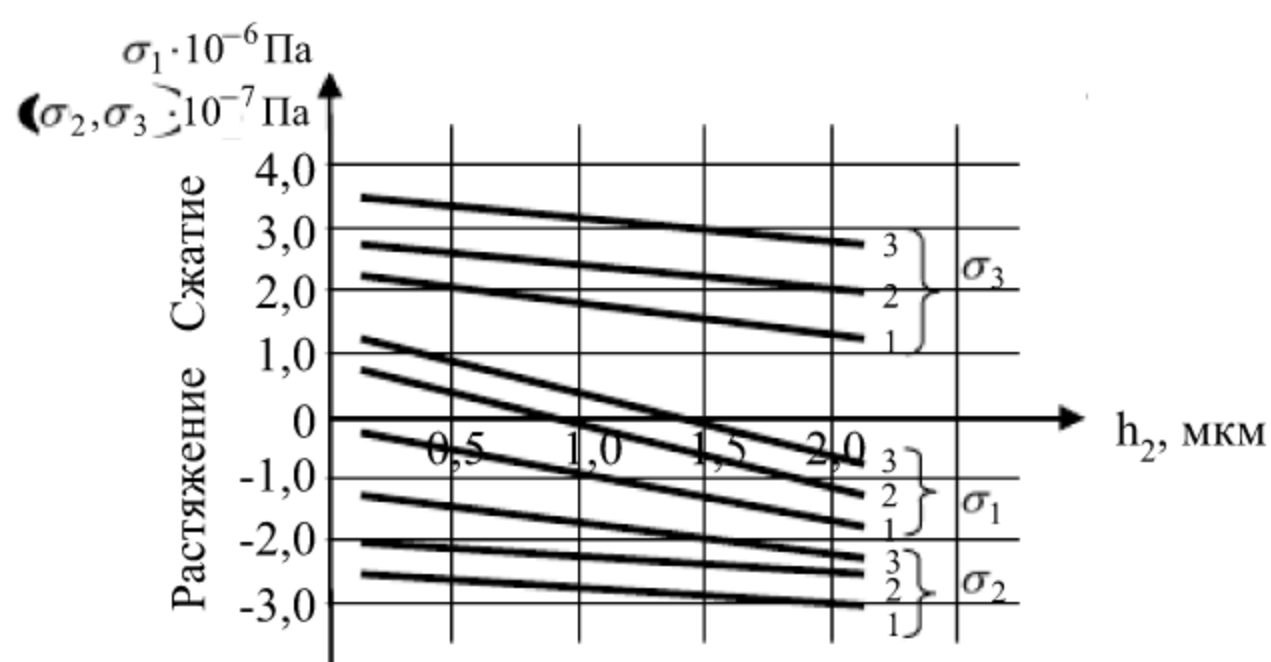


Рис. 2.20. Зависимость напряжений от толщины стеклянного слоя:
1 — $h_3 = 0,5$ мкм; 2 — $h_3 = 1$ мкм; 3 — $h_3 = 1,5$ мкм; 4 — $h_3 = 2$ мкм

Надо отметить, что растягивающие напряжения в слое пермаллоя являются опасными, если КЛТР пермаллоя больше, чем КЛТР феррита. В этом случае могут происходить разрушения пермаллового слоя. В работе [51] это учтено при выборе КЛТР пермаллоя. Как показывают расчеты напряжений, КЛТР пермаллоя и феррита должны отличаться на $\Delta\alpha = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, а КЛТР стекла и пермаллоя практически одинаковые. Из приведенных графиков видно, что на распределение напряжений в трехслойных соединениях существенное влияние оказывают КЛТР и толщины слоев. Надо также отметить, что величины внутренних напряжений и характер их распределения зависят и от многих технологических условий напыления пермаллоя на феррит и оплавления стекла на пермаллой.

2.5. Исследование механических напряжений в двухслойной структуре ВГ

При разработке конструкции ВГ для формирования полюсных наконечников целесообразно в качестве магнитного проводника использовать тонкие пленки магнитомягких ферромагнетиков (например, пермаллоя).

При формировании пленки на подложке происходит образование разного рода несовершенств ее кристаллической структуры (вакансии, примесные атомы, дислокации и т.д.), что и сопровождается возникновением внутренних напряжений в структурах “стекло – феррит”, “пермаллой – феррит”, “стекло – пермаллой”. Наряду с этим из-за различия КЛТР пленки и подложки после охлаждений образуются внутренние термические напряжения (остаточные). В данной работе

решалась задача определения механических напряжений в двухслойных структурах с учетом их геометрических размеров (согласно конструктивным требованиям) и различных физико-механических свойств (согласно технологии изготовления). Для расчета напряжений использовалась задача, рассмотренная в работе [47]. Исследуется распределение нормальных и касательных напряжений (рис. 2.21) в двухслойной пластине конечных размеров. Составляющие напряжений рассчитывались по формулам [52]:

– для нормальных напряжений

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\delta E_1 h_1 (k+1)^2 \left(\frac{1}{h_1} - \frac{6z}{h_1 + h_2} \right)}{1 - \mu_1 (1 - k + 4k^2) + 1 - \mu_2 \frac{E_1}{E_2} (k^2 - k + 4)k}, \quad (2.76)$$

– для касательных напряжений

$$\tau_x = \frac{\delta E \frac{h_1}{a} \left[1 - \frac{4k}{1 + k^2} \right]}{1 - \mu_1 (1 - k + 4k^2) + 1 - \mu_2 \frac{E_1}{E_2} (k^2 - k + 4)k}, \quad (2.77)$$

$$\tau_y = \frac{\delta E \frac{h_1}{b} \left[1 - \frac{4k}{1 + k^2} \right]}{1 - \mu_1 (1 - k + 4k^2) + 1 - \mu_2 \frac{E_1}{E_2} (k^2 - k + 4)k}, \quad (2.78)$$

где $\delta = (\alpha - \alpha_1)(T - T_0)$; $z = \frac{h_2 - h_1}{2}$; $k = \frac{h_1}{h_2}$; E_1, E_2 – модуль Юнга со-

ответственно верхнего и нижнего слоев; μ_1, μ_2 – коэффициенты

Пуассона; α_1, α_2 – температурные КЛТР; T, T_0 – температуры материалов; h_1, h_2 – толщины соответствующих материалов; a, b – ширина и длина материалов.

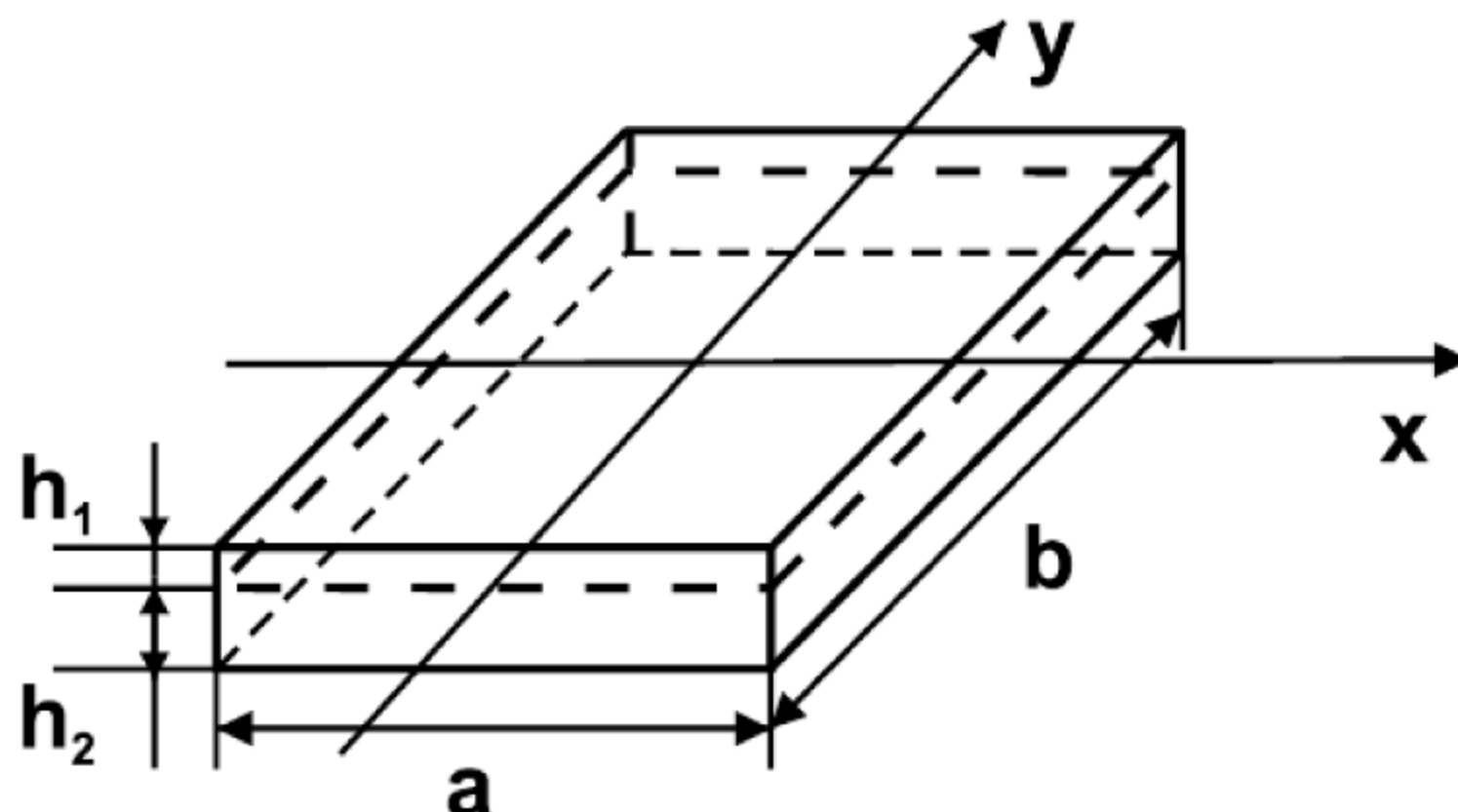


Рис. 2.21. Модель двухслойной структуры

Напряжения определялись для следующих структур материалов: стекло – феррит, стекло – пермаллой, пермаллой – феррит с набором физико-механических свойств, представленных в табл. 2.5. Расчеты проводились в зависимости от различных геометрических размеров структур, соотношение толщин изменялось от $K = 0,001$ до $K = 10$.

Таблица 2.5

Параметры конструктивных материалов видеоголовки

Материал	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, 10^{-6} кг/мм ²	КЛТР, 10^7 1/°C
Стекло	0,18 – 0,25	7,0 – 8,0	9,0 – 11,0
Пермаллой	0,25 – 0,3	10,0 – 13,0	7,8 – 8,1
Феррит	0,27 – 0,3	9,0 – 11,0	9,0 – 10,2

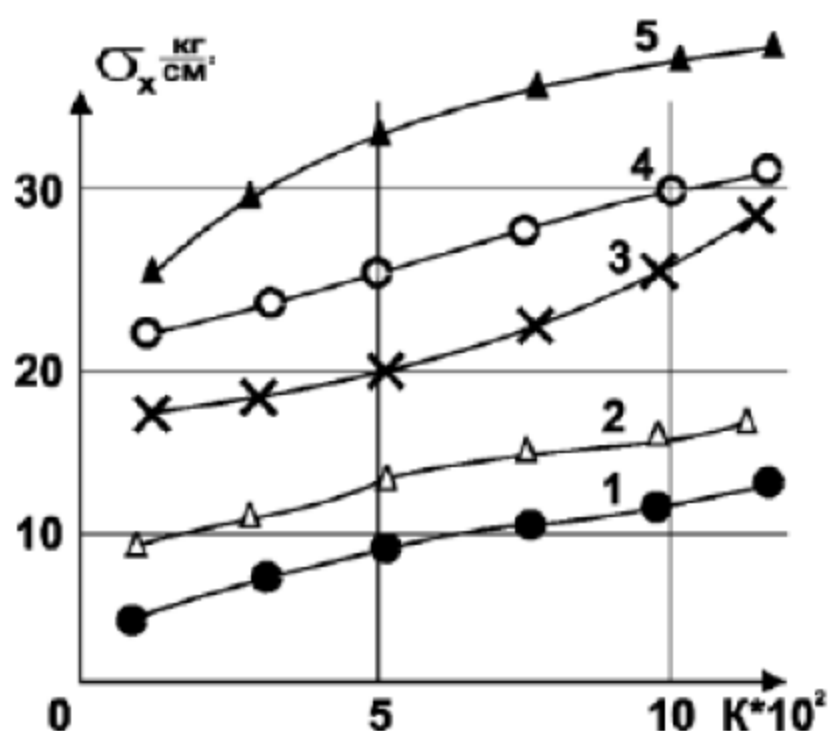


Рис. 2.22. Зависимость нормальных напряжений (σ_x) от соотношений толщин (K) в структурах стекло – феррит:

- | | | |
|---------------------------------------|-------------------|------------------------|
| 1) $\Delta\alpha = 5 \cdot 10^{-7}$; | $E_1/E_2 = 0,7$; | $\mu_1/\mu_2 = 0,7$; |
| 2) $\Delta\alpha = 5 \cdot 10^{-7}$; | $E_1/E_2 = 0,7$; | $\mu_1/\mu_2 = 0,6$; |
| 3) $\Delta\alpha = 2 \cdot 10^{-7}$; | $E_1/E_2 = 0,9$; | $\mu_1/\mu_2 = 0,55$; |
| 4) $\Delta\alpha = 2 \cdot 10^{-7}$; | $E_1/E_2 = 0,9$; | $\mu_1/\mu_2 = 0,5$; |
| 5) $\Delta\alpha = 1 \cdot 10^{-7}$; | $E_1/E_2 = 0,7$; | $\mu_1/\mu_2 = 0,5$ |

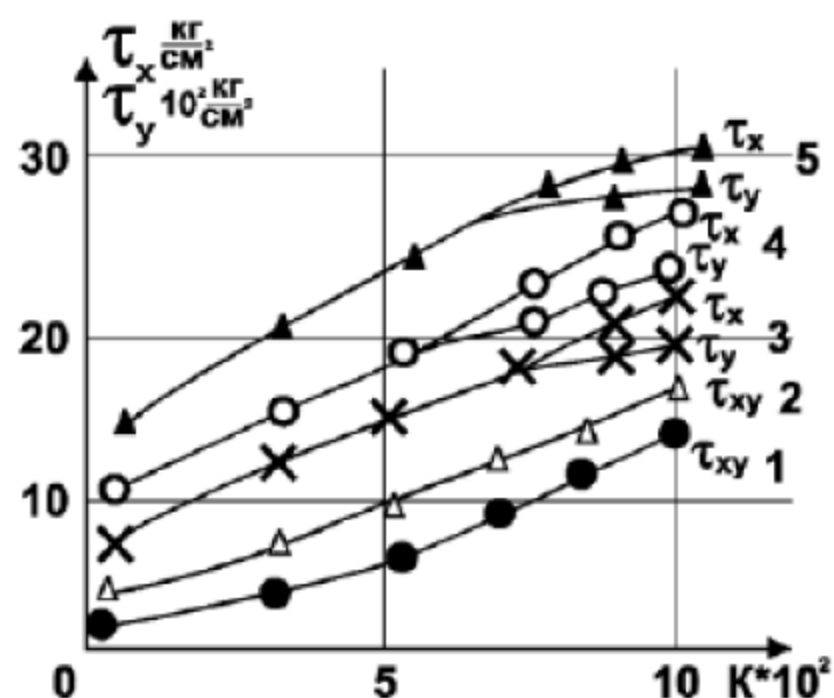


Рис. 2.23. Зависимость касательных напряжений (τ_x, τ_y) от соотношений толщин (K) в структурах стекло – феррит:

Расчеты нормальных и касательных напряжений относятся к так называемым согласованным по КЛТР спаям, когда различие коэффициентов не превышает величину $1 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ [53 – 55].

На рис. 2.22 и 2.23 представлены характерные изменения нормальных и касательных напряжений соответственно с учетом толщины и различных физико-механических свойств стекла и феррита. Из графиков видно, что нормальные напряжения при согласованных КЛТР (при данных толщинах) составляют величину порядка (5 – 10) кг/см^2 , увеличение разности величины КЛТР приводит к возрастанию напряжений до 50 кг/см^2 . Как видно из рис. 2.22, на характер зависи-

мости и величину нормальных напряжений существенную роль оказывает выбор коэффициентов Пуассона. При увеличении соотношения до 0,5 (при прочих равных условиях) нормальные напряжения увеличиваются на 40 – 60 %, следовательно, при выборе спаиваемых материалов кроме согласованных КЛТР требуется подбирать и согласованные коэффициенты Пуассона при соответствующих различиях в толщинах. Как видно из рис. 2.23 (с учетом конфигурации двухслойного соединения), величина касательных напряжений по оси X на 2 порядка больше, чем в направлении Y. При соотношениях толщин $K = (7 \div 10) \cdot 10^{-2}$ касательные напряжения по оси X увеличиваются по сравнению с τ_y на 10 – 20 %, что вызвано существенным различием в коэффициентах Пуассона.

При соотношении толщин $K = 1 - 10$ нормальные напряжения (рис. 2.24) уменьшаются значительно в спаях стекло – пермаллой, в спаях пермаллой – феррит они еще заметны. Для касательных напряжений характер зависимости (рис. 2.25) остается в целом такой же, что и для σ_x . Однако для спаев стекло – пермаллой для толщины $K = 10$ напряжение стремится к 0, т.е. спай становятся ненапряженными. Это может быть объяснено релаксацией напряжений в объеме стекла. Из рис. 2.26 следует, что для структур стекло – феррит нормальные напряжения при $K = 0,1$ уменьшаются практически в 3 раза по сравнению с $K = 0; 0,1$. Это говорит о том, что выравнивание толщин данных материалов приводит к более полной релаксации структурных нарушений.

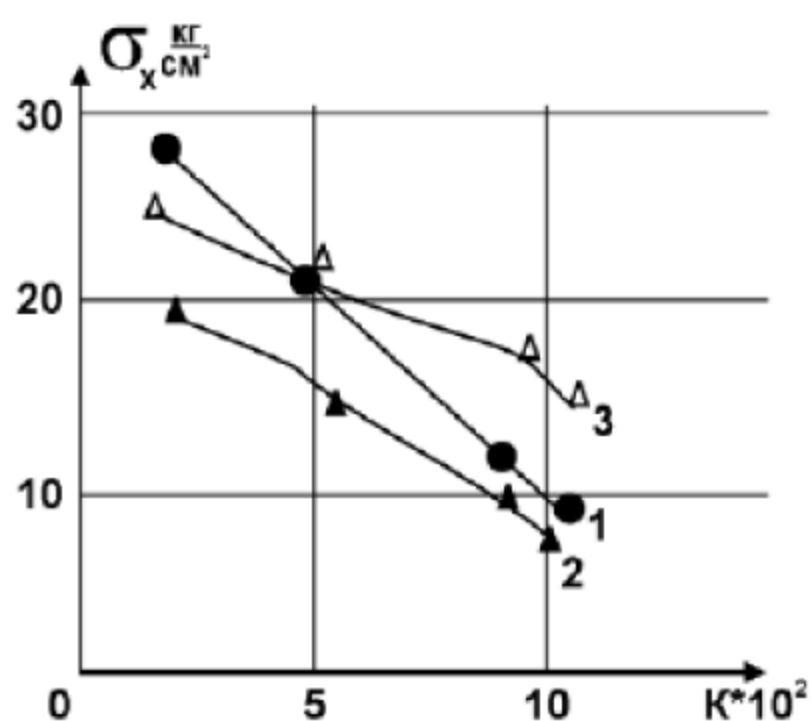


Рис. 2.24. Зависимость нормальных напряжений от соотношения толщин в структурах:

1 – стекло – феррит; 2 – стекло – пермаллой; 3 – пермаллой – феррит

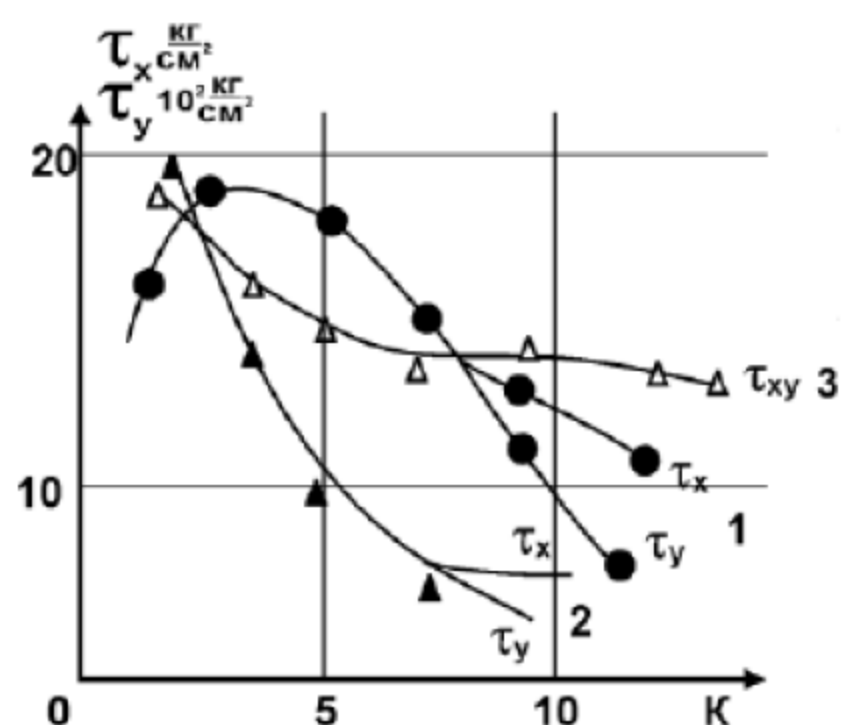


Рис. 2.25. Зависимость касательных напряжений от соотношения толщин в структурах:

1 – стекло – феррит; 2 – стекло – пермаллой; 3 – пермаллой – феррит

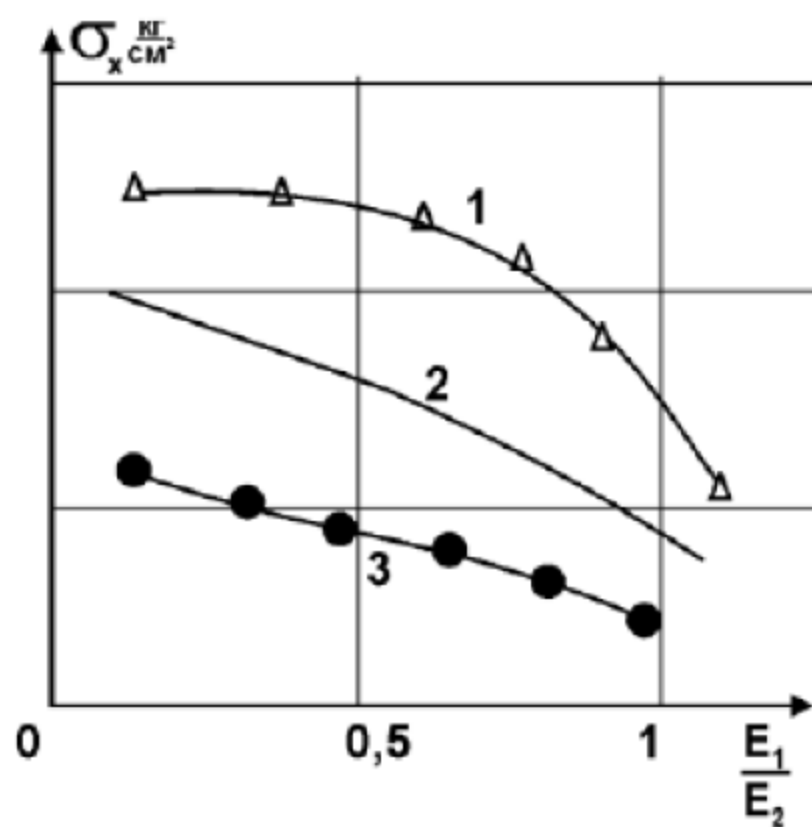


Рис. 2.26. Зависимость нормальных (σ_x) напряжений от соотношения модулей Юнга (E_1/E_2) в структурах “стекло – феррит”:
1 – $K=0,1$; 2 – $K=0,05$; 3 – $K=0,01$

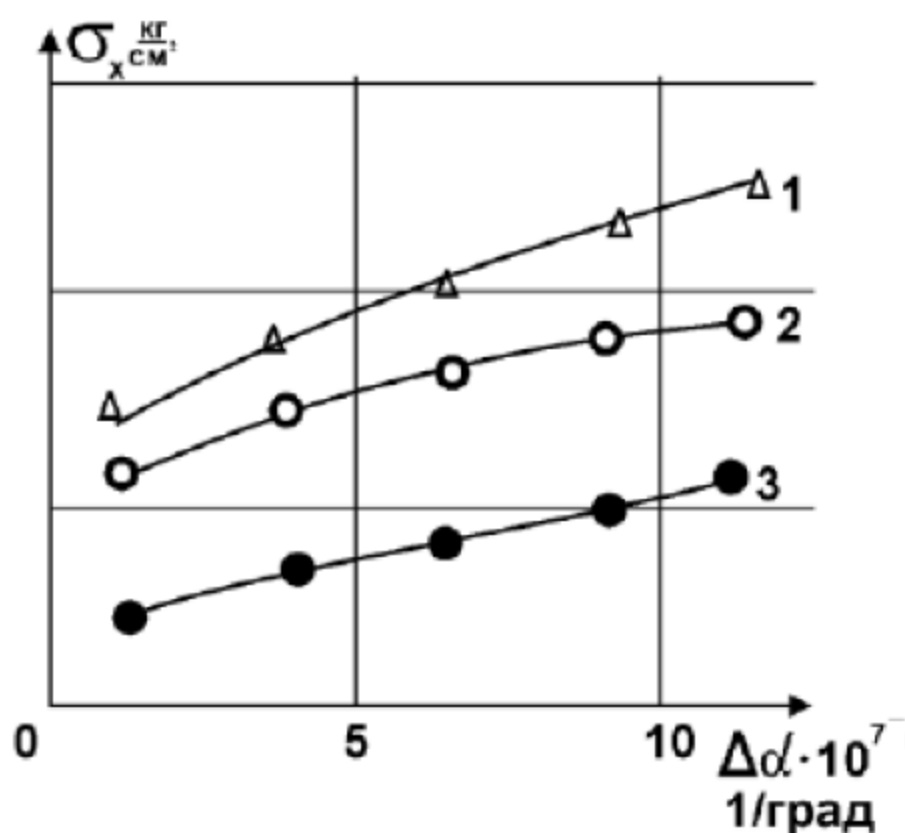


Рис. 2.27. Зависимость нормальных (σ_x) напряжений от разности КЛТР в структурах “стекло – феррит”:
1 – $K=0,1$; 2 – $K=0,05$; 3 – $K=0,01$

Из рис. 2.27 видно, что увеличение КЛТР структур стекло – феррит приводит к почти линейному возрастанию механических напряжений. С увеличением соотношения толщины структур напряжения остаются постоянными.

В работе проведены экспериментальные исследования различных структур “стекло – феррит” с изменением $K=0,01+1$ и с использованием поляриметра ПКС-56. Как показывают результаты, величины механических напряжений изменялись в зависимости от соотношения толщины стекла и феррита от 20 до 40 кг/см².

Представленные результаты позволяют определить напряжения в двухслойных структурах: “стекло – феррит”, “стекло – пермаллой” и “пермаллой – феррит”. Они также показывают, что используемые размеры и геометрия материалов вносят незначительные напряжения, которые немного меньше критических напряжений (10^3 кг/см), способных приводить к разрушению структур.

Приведенные данные могут быть использованы в качестве экспресс-метода по подбору материалов с заданными физико-механическими свойствами и геометрией для получения ненапряженных структур. Данный метод может быть использован для определения напряжений в трехслойных структурах (феррит – стекло – сендаст).

2.6. Динамические исследования макронапряжений пленок пермаллоя

Исследования макронапряжений пленок пермаллоя обусловлены необходимостью экспериментального подтверждения температурной и временной стабильности свойств магнитопроводящего слоя пермаллоя, граничащего с рабочим зазором МГ. Тонкая плёнка пермаллоя, создаваемая как магнитомягкий магнитопровод, после нанесения на полублоки испытывает температурные воздействия при соединении полублоков, а также предшествующем ему нанесении слоя диэлектрика. Указанные этапы технологии изготовления головки проводились при температурах до 400 °С, и этот рубеж определил диапазон температур для исследований.

Под динамическими подразумеваются исследования свойств, пленок, проводящиеся непосредственно в процессе температурного воздействия, т.е. изучается поведение интересующих нас структур в условиях технологического процесса. Изучалось изменение макронапряжений пленок пермаллоя по методике, изложенной в [56].

Наиболее уязвимым местом рабочего зазора магнитной головки считали пленку пермаллоя, идущую по поверхности стекла. На поверхности феррита силы схватывания, появляющиеся на границе срастания полублока с магнитопроводом, по-видимому, определяются взаимодействием феррита (твердая фаза) с напыляемым пермаллоем. При напылении последний проходит этапы: пар – жидкость – кристалл, которые обеспечивают физико-химические взаимодействия с ферритом.

Предполагаем, что на поверхности феррита адгезия слоя магнитопровода будет выше, чем на стекле. Поэтому было решено исследовать поведение пленок на стекле.

Образцы для исследований макронапряжений в пленке получены напылением металла на полосы покровного стекла шириной 3 мм, длиной 30 мм и толщиной 0,15 мм. После напыления двухслойная структура стекло – металлическая пленка до исследований хранилась на воздухе, напряжения в пленке проявлялись изгибом образца, измеряемым по методике, описанной в [56].

Результаты исследования макронапряжений в пленках хром – пермаллой на «покровном» стекле представлены на рис. 2.28 – 2.30. Пленки получены за один вакуумный цикл, одновременно с теми, что предназначались для исследования электросопротивления; так же напылялись и исследовались без магнитного поля и в присутствии его. Зависимости напряжений от температуры снимались в вакууме по методике, описанной в [56].

2.6.1. Исследование магнитных напряжений в двухслойной структуре ВГ

Анализ результатов начнем с рассмотрения кинетики изменения макронапряжений.

В процессе напыления на экспериментальные подложки в вакууме формирование слоя металла шло по схеме "пар – жидкость – кристалл". Напыляемый металл отдает теплоту при переходе из пара в жидкость и из

жидкости в кристалл подложке. Поэтому в процессе осаждения пленки область подложки под пленкой резко разогревается. В нашем случае подогрев подложки перед напылением производился до 300 °С. Минимальная температура плавления пермаллоя (переход из пара в жидкость) около 1600 °С. Таким образом, за время напыления (до 1,5-2 минут) поверхностный слой подложки сильно разогревается, и фронт максимальной температуры движется в основе растущего слоя пленки.

После застывания жидкой фазы теплоотдача в предметный столик и окружающую среду из подложки продолжается, а пленка интенсивно охлаждается. Если КЛТР материала пленки превышает КЛТР подложки, то в области границы раздела при охлаждении образцов могут появиться механические напряжения. Это должны быть растягивающие пленку напряжения, в образце, извлеченном из вакуумной камеры после напыления. Однако почти все зависимости $\sigma = f(T)$ показывают, что в пленках до термообработки присутствуют напряжения сжатия. Пластины стекла с пленкой были выпуклыми со стороны пленки.

Для объяснения этого явления вспомним, что приведенная выше кинетика формирования макронапряжений более приемлема для чистых металлов, напыленных однородным слоем. В данном случае вначале наносится слой хрома, обеспечивающий сцепление с подложкой. Затем наносится пермаллой, причем в несколько этапов, так как испарение металла идет из двух испарителей и для большей эффективности испарения и увеличения толщины пленки (до 1-1,5 мкм) каждый испаритель прокаливался до рабочего режима дважды.

Первое напыление пермаллоя на хром формирует сплав хром – железо – никель, превышающий прочность отдельных компонентов.

Последующие нанесения жидкой фазы пермаллоя приводят к частичному растворению в ней нижележащего слоя.

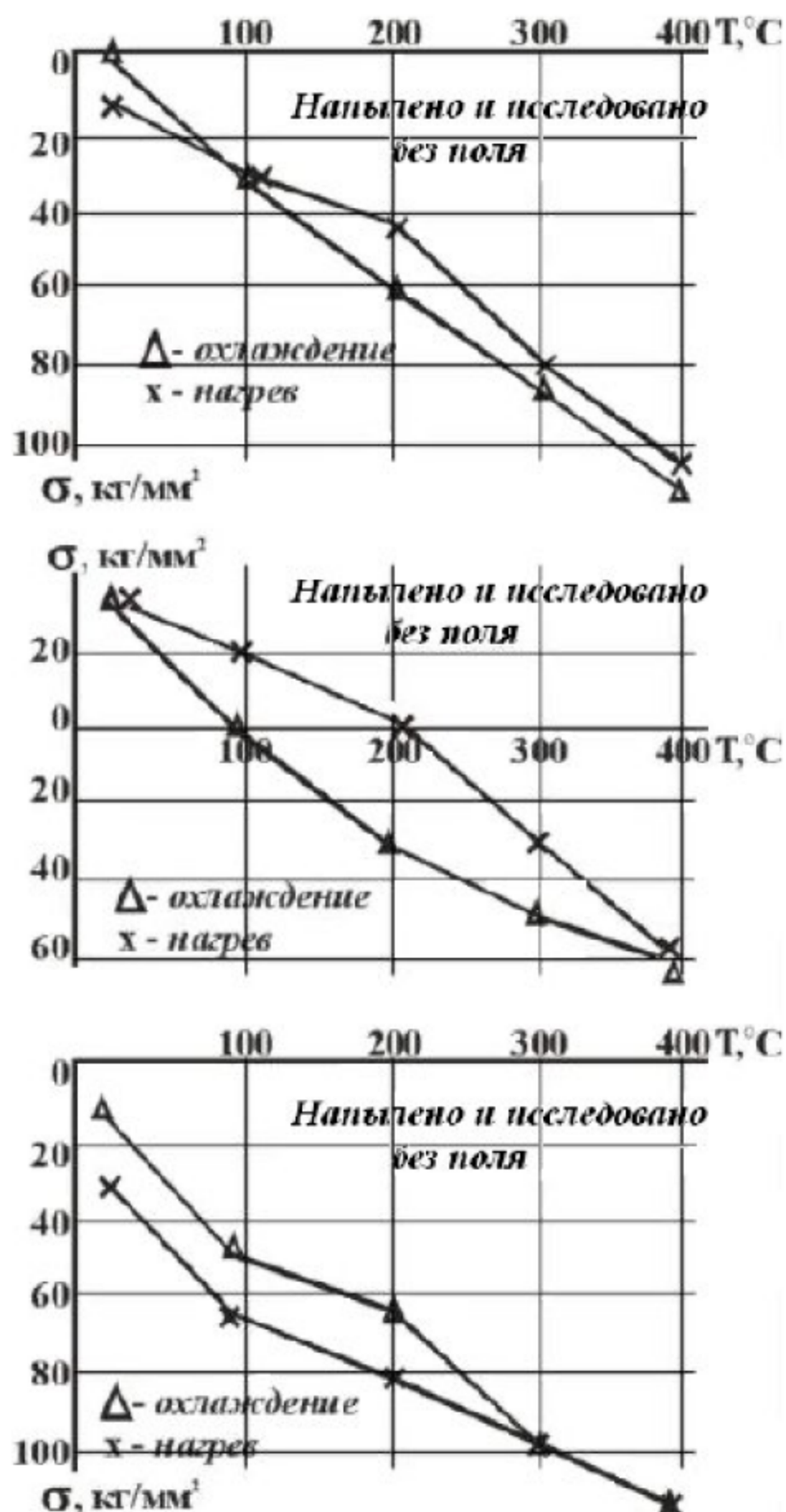


Рис. 2.28. Динамические зависимости макронапряжений в пленках хром – пермаллой от температуры при вакуумном нагреве (Δ) и охлаждении (x) со скоростью 20 град/мин

Другая особенность напыления на прочную пленочную основу состоит в том, что имеющиеся в нижнем слое дефекты структуры (поры, вакансии, линейные дефекты) заполняются при нанесении последующих слоев. Здесь может происходить диффузионное заполнение дефектов и, более того, примесная диффузия никеля в твердую фазу. Ставший перенасыщенным диффундирующими атомами слой затем постепенно охлаждается. Снимающие напряжения могут сохраняться в нем до комнатной температуры, так как они при напылении были велики, а также потому, что диффузионное движение в подобных структурах наблюдается до температур 250 – 300 °С.

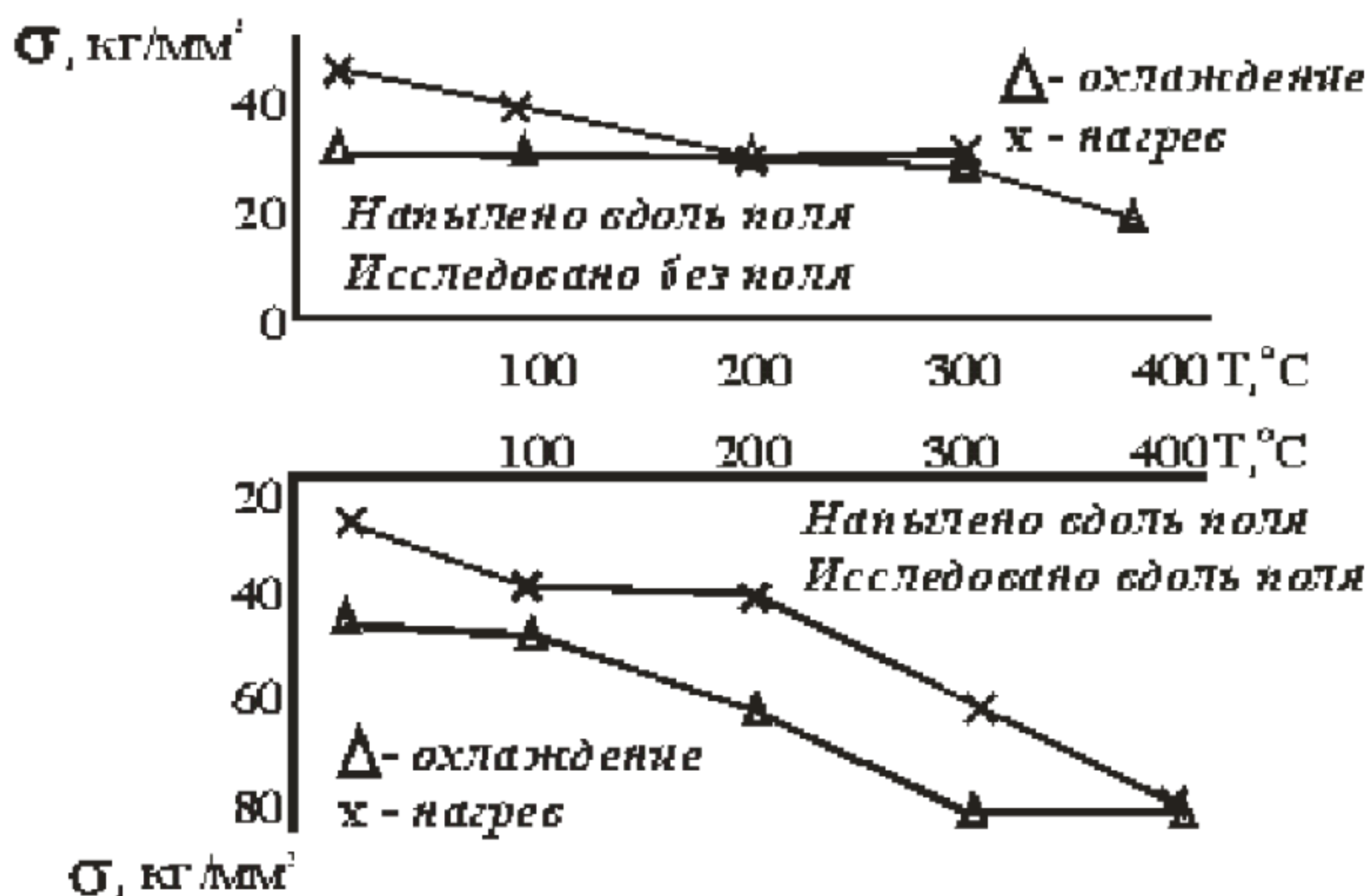


Рис. 2.29. Динамические зависимости макронапряжений в пленках хром – пермаллой от Т при вакуумном нагреве (Δ) и охлаждении (х) со скоростью 20 град/мин: а – без поля; б – параллельно линиям поля

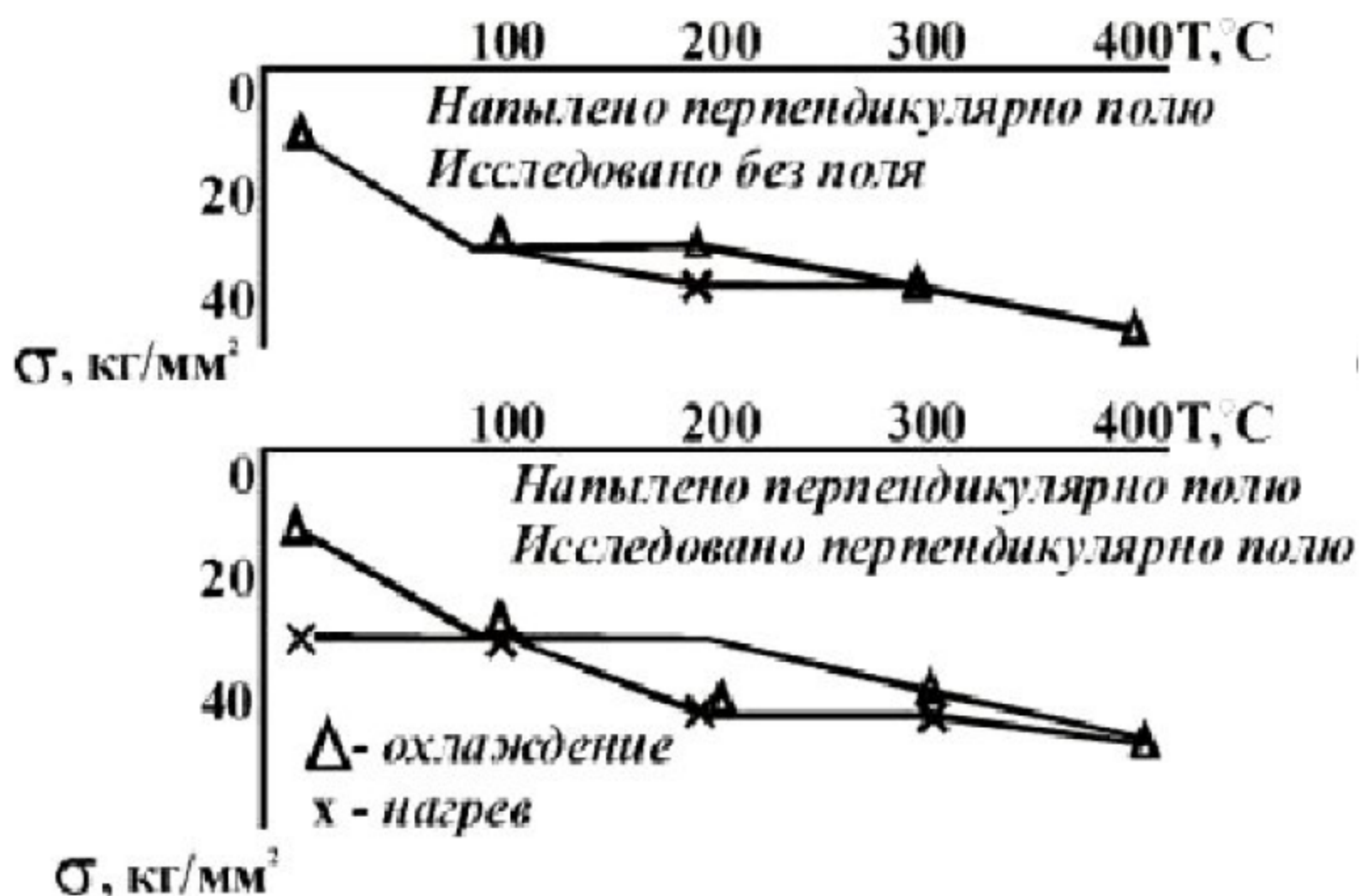


Рис. 2.30. Динамические зависимости макронапряжений в пленках хром – пермаллой от температуры (условия напыления и исследования подобны рис. 2.28)

В процессе термообработки могут происходить изменения структуры материала пленки. Она может упорядочиваться, уменьшаясь в объеме. При этом дефекты уходят на поверхность. Макронапряжения изменяются в этом случае в сторону растяжения пленки. На графиках данного эффекта нет. Инициатором подобных структурных изменений может быть ориентирующее воздействие подложки. Но стеклянные подложки, их поверхность и состав влияние на пленку не оказывают. Структурные превращения могут происходить в самом материале. Это характерно для резковыраженных кристаллических металлов: тугоплавких, прочных, хрупких, таких, как ванадий, хром, титан. В пленках этих металлов резкое сокращение удельного объема наблюдается при увеличении темпе-

ратуры до 100 °С и влечет за собой уменьшение электросопротивления и резкое нарастание растягивающих пленку напряжений.

Отсутствие таких переходов в пленках можно объяснить тем, что резкие структурные перемены наблюдаются в пленках чистых металлов, а в данном случае велась работа со сплавом двух пластичных металлов – железа и никеля, легированных хромом. Ясно, что описанные структурные переходы в магнитопроводе были бы источниками нестабильности параметров головки и нежелательны. Однако, как показано выше, причин для их появления в слое хром – пермаллой нет и это принципиально положительный результат исследований.

Напряжения по своему характеру близки к термическим, которые можно оценить с помощью выражения

$$\sigma_T = \frac{E}{1-\nu} (\alpha_{p1} - \alpha_{p2}) \Delta T, \quad (2.79)$$

где E и ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала пленки, α_{p1} и α_{p2} – коэффициенты расширения пленки и подложки, ΔT – диапазон температур. Согласно термической модели нагрев равновесной структуры (не имеющей напряжений) увеличивает напряжения сжатия в пленке, если ее α_p больше, чем α_p подложки. В данных случаях так и происходит, а затем охлаждение от 400 °С до комнатной температуры всюду возвращает напряжения к прежним величинам.

В точке максимальной температуры все образцы находились по 10 минут. Кривизна подложек при этом не менялась, т.е. релаксации напряжений за счет микропластичности слоя не происходило. Это

подтверждает предположение о прочности пленки пермаллоя, легированной хромом.

Зависимости $\sigma(T)$, показанные на рис. 2.28, 2.29 и 2.30, представляют самостоятельный интерес. Кривые (см. рис. 2.28) получены на пленках, напыленных и исследованных без влияния магнитного поля. У них наибольший разброс величин напряжений, характер и изменения при нагреве отличаются от этапа охлаждения. По ним видно, что процесс отжига влияет на структуру и этап охлаждения идет по модели, более близкой к объемному материалу. Кривые охлаждения более линейны. Как магнитный материал для видеоголовок, эти пленки имеют несомненные достоинства. В частности, после отжига напряжения у них уменьшаются и в собранной видеоголовке они будут стабильными. С другой стороны, это не приведет к связанному с макронапряжениями росту коэрцитивной силы материала.

Кривые на рис. 2.29 и 2.30, полученные на пленках, напыленных в присутствии магнитного поля, охватывают меньший диапазон напряжений. Влияние магнитного поля здесь несомненно, напряжения меньше по величине и кривые, соответствующие этапам нагрева и охлаждения, ближе друг к другу, чем на рис. 2.28. О характере влияния поля на свойства пленок говорить рано, так как дополнительные исследования в этом направлении не проводились. Из кривых видно, что изменение направления магнитных силовых линий при исследовании относительно ориентации при напылении приводит к разбросу кривых.

В плане выработки рекомендаций по применению результатов и технологии изготовления видеоголовок отметим, что полученные пленки хром – пермаллой (благодаря своим пластическим свойствам) резких

изменений напряжений не имеют и в специальных этапах отжига для снятия напряжений не нуждаются.

По кривым $\sigma(T)$ можно определить КЛТР материала пленки и учитывать его при выборе материала рабочего зазора головки.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ГОЛОВОК

Проектирование МГ – сложная и многофункциональная задача, имеющая целый комплекс интеллектуальных и технических аспектов. Основная часть архитектуры САПР для проектирования МГ, представленная на рис. 3.1, включает математическое обеспечение (МО), программное обеспечение (ПО) и часть технического обеспечения (ТО), связанного с реализацией автоматизированных измерительных комплексов для контроля свойств магнитных сплавов и динамического взаимодействия МГ с лентой.

Таким образом, основа разрабатываемой САПР для проектирования МГ состоит из нескольких подсистем:

- *Подсистема моделирования синтеза материалов для изготовления МГ.* Начальный этап проектирования включает разработку математических моделей (ММ) зависимости свойств материалов от их составов, которые необходимы для получения компонентов МГ с заданными свойствами. Процесс формирования данных моделей проводится сначала для частных случаев, далее создаются универсальные ММ, которые возможно применить для широкого спектра материалов с разнообразными свойствами.

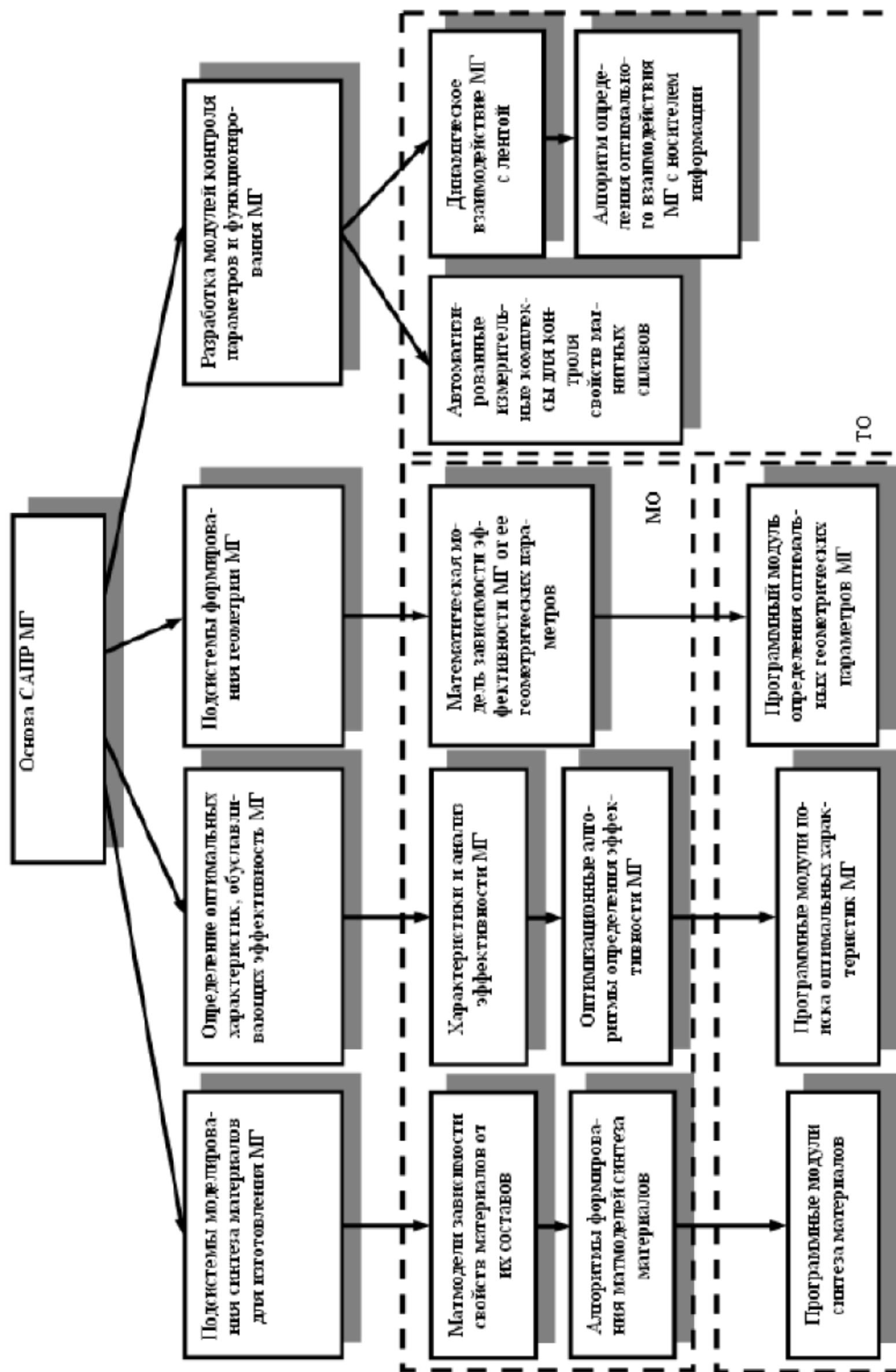


Рис. 3.1. Основная часть архитектуры САПР для разработки МГ

На втором этапе производится разработка алгоритмов, позволяющих формировать аналогичные ММ автоматизированным способом. Основными составляющими разработанных алгоритмов являются количество параметров и диапазон их изменения, определяющие состав и свойства материала.

Третий этап включает создание программных модулей (ПМ), которые позволяют синтезировать материалы с необходимыми свойствами. В качестве исходных данных для этих ПМ выступают накопленные экспериментальные значения параметров исследованных материалов.

Необходимо учитывать исследуемые материалы в совокупности друг с другом, так как они образуют спаи и соединения, которые могут дать другие результирующие параметры, определяющие оптимальную работу МГ.

● *Определение оптимальных характеристик, обуславливающих эффективность работы МГ.* В этой части САПР МГ проводится анализ характеристик МГ и разрабатываются оптимизационные алгоритмы синтеза ММ. Обозначенные алгоритмы базируются на поиске основных параметров, определяющих характеристики МГ. Направление поиска оптимальных характеристик задает пользователь системы.

Если поверхность исследуемой функции имеет несколько экстремумов, необходим выбор алгоритма поиска оптимальных характеристик (алгоритм должен иметь инструменты для выхода из локальных минимумов).

● *Подсистема формирования геометрии МГ.* На данном этапе происходит формирование математической модели зависимости эффективности МГ от ее геометрических параметров, что позволяет создать программный модуль определения оптимальных геометрических параметров МГ.

● *Разработка модулей контроля параметров и функционирования МГ.* Данный пункт объединяет две составляющие, которые относятся к ТО разрабатываемой САПР МГ:

- 1) автоматизированные измерительные комплексы для контроля свойств магнитных сплавов;
- 2) динамическое взаимодействие МГ с лентой.

Первая составляющая относится к аппаратной поддержке разрабатываемой САПР, с помощью которой измеряются свойства магнитотвердых сплавов. Данный комплекс позволяет автоматизировать исследование магнитных сплавов и определить соответствие синтезированного сплава требуемым свойствам, предъявляемым к материалам для производства МГ.

Во второй составляющей рассматриваются ММ взаимодействия МГ с носителем информации, а также алгоритмы их оптимальной работы. Это позволяет моделировать взаимодействие МГ с носителем информации и определять, какие из параметров требуют корректировки в целях получения наиболее качественного взаимодействия в определенный интервал времени [57 – 63].

3.1. Математические модели зависимости свойств материала от его состава для изготовления МГ

При проектировании МГ важен подбор материалов с необходимыми свойствами. Выбор компонентов для изготовления МГ влияет на качество продукта и на его параметры, т. е. определяет эксплуатационные характеристики МГ. В процессе подбора материалов изготавливается множество пробных образцов, синтез которых является высокотехнологичным и дорогостоящим.

Актуальность обозначенной проблемы объясняет необходимость создания системы автоматизированного проектирования МГ для устройств магнитной записи. Разработка МГ начинается с подбора конструктивных материалов, который проходит в 2 этапа: 1) создание ММ синтеза материалов для МГ, 2) нахождение с помощью полученных ММ материалов со свойствами, близкими к оптимальным для заданных характеристик компонентов МГ.

3.1.1. Математическая модель синтеза стекловидных диэлектриков для спаев стекла с титаном

Разработка ММ проводилась на примере получения стекловидного диэлектрика системы $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ для спая феррит–стекло–титан при проектировании ММГ. В процессе поиска оптимального состава стекла были получены экспериментальные составы стекол, представленные в табл. 3.1. Это позволило создать ММ зависимости свойств стекол 1 – 10 (КЛТР, T_g , Н) от их составов.

Для поиска эмпирической формулы, которая связывает свойства стекол (КЛТР, T_g , Н) с процентным содержанием их компонентов (x_1, \dots, x_9 – векторы, задающие процентное содержание каждого компонента стекол 1 – 10), используется метод Брандона [64].

Таблица 3.

Составы и свойства стекол

№ оп	Основа стекла, % вес.			Добавки, % вес.						Свойства стекол		
	PbO	B ₂ O ₃	ZnO	SiO ₂	Bi ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CuO	Sb ₂ O ₃	MgO	КЛТР, 10 ⁷ К ⁻¹	T_g , °С	Н, кг/мм ²
1	74	10	10	2	0,5	3,5	-	-	-	85	386	410
2	74,5	10	10	2	1	-	2,5	-	-	83	384	415
3	76,3	10	10	2	1,2	-	0,5	-	-	82	392	410
4	76,4	10	10	2	1,5	-	-	0,1	-	86	376	415
5	71,5	10	10	2	6,5	-	-	-	-	85	372	430
6	76	10	10	2	1,5	-	-	0,5	-	85	386	420
7	73,5	10	10	2	1,5	-	-	3,0	-	87	374	415
8	74	10	10	2	1,5	-	-	2,0	0,5	85	381	435
9	74,4	10	10	2	1,5	-	-	2,0	0,1	86	409	440
10	74,4	10	10	1	1,5	-	-	0,1	3,0	86	410	420

Примечание. T_g – температура размягчения стекла; Н – микротвердость стекла.

В данном случае:

$$y_1 = \bar{y}_1 f_1(x_1) f_2(x_2) f_3(x_3) f_4(x_4) f_5(x_5) f_6(x_6) f_7(x_7) f_8(x_8) f_9(x_9), \quad (3.1)$$

$$y_2 = \bar{y}_2 f_{10}(x_1) f_{11}(x_2) f_{12}(x_3) f_{13}(x_4) f_{14}(x_5) f_{15}(x_6) f_{16}(x_7) f_{17}(x_8) f_{18}(x_9), \quad (3.2)$$

$$y_3 = \bar{y}_3 f_{19}(x_1) f_{20}(x_2) f_{21}(x_3) f_{22}(x_4) f_{23}(x_5) f_{24}(x_6) f_{25}(x_7) f_{26}(x_8) f_{27}(x_9). \quad (3.3)$$

Здесь y_1 – вектор экспериментальных значений КЛТР; y_2 – вектор значений T_g ; y_3 – вектор значений микротвердости H ; \bar{y}_1 – среднее арифметическое вектора y_1 ; \bar{y}_2 – среднее арифметическое вектора y_2 ; \bar{y}_3 – среднее арифметическое вектора y_3 .

Функция $f_j(x_i)$ подбирается в зависимости от характера влияния x_i на y и может быть возрастающей или убывающей, линейной или нелинейной (степенной, показательной, экспоненциальной и т. д.).

3.1.2. Математическая модель синтеза стекловидных диэлектриков при формировании соединения стекла с ферритом

В процессе синтеза материала в системе $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--R}_2\text{O--RO}$ (рис. 3.2, [65,66]) с заранее заданными свойствами был использован метод симплексного планирования эксперимента – выбор количества и условий проведения опытов, минимально необходимых для решения поставленной задачи (в соответствии с требованием к стекловидным диэлектрикам для формирования рабочего зазора и поверхности МГ). Результаты эксперимента легли в основу построения математической модели, с помощью которой производился расчет требуемых параметров: КЛТР и микротвёрдости.

Экспериментальные точки при симплекс-центроидном планировании располагаются по всему симплексу, число их равно числу коэффициентов полинома степени n [67].

Рассматриваем систему $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--ZnO}$ с соотношением компонентов $x_1+x_2+x_3=1$, где x_1 – весовая доля SiO_2 ; x_2 – ZnO ; x_3 – B_2O_3 .

Для расчета область стеклообразования (симплекс) была разбита на 2 треугольника (см. рис. 3.2). Вершины треугольника z_1 , z_2 и z_3 выражены координатами в весовых долях компонентов системы (x_1 , x_2 , x_3). Треугольник 1 с вершинами z_1 (0,4; 0; 0,6); z_2 (0,3; 0,4; 0,3) и z_3 (0,119; 0; 0,881). Треугольник 2 с вершинами z_1 (0,4; 0,2; 0,4); z_2 (0,3; 0,4; 0,3) и z_3 (0,4; 0; 0,6).

Экспериментальные точки (составы стекол) для составления матрицы планирования неполного третьего порядка выбираются в вершинах, центре и на серединах граней треугольников (рис. 3.3).

Исследование КЛТР экспериментальных составов стекол показало их несоответствие заданному значению КЛТР в области треугольника 2, поэтому в дальнейшем изучению подвергались составы стекол, относящиеся к области треугольника 1.

Координаты экспериментальных точек, как и результаты измерения КЛТР стекол области треугольника 1 (матрица планирования), отображены в табл. 3.2.

На основании матрицы планирования треугольника 1 была составлена модель неполного третьего порядка для трехкомпонентной смеси, имеющая вид

$$\alpha = \beta_1 \cdot Z_1 + \beta_2 \cdot Z_2 + \beta_3 \cdot Z_3 + \beta_{12} \cdot Z_1 \cdot Z_2 + \beta_{13} \cdot Z_1 \cdot Z_3 + \beta_{23} \cdot Z_2 \cdot Z_3 + \beta_{123} \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3, \quad (3.4)$$

где

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \alpha_1, \quad \beta_{12} = 4\alpha_{12} - 2\alpha_1 - 2\alpha_2, \\ \beta_2 &= \alpha_2, \quad \beta_{12} = 4\alpha_{13} - 2\alpha_1 - 2\alpha_3, \\ \beta_3 &= \alpha_3, \quad \beta_{23} = 4\alpha_{23} - 2\alpha_2 - 2\alpha_3, \\ \beta_{123} &= 27\alpha_{123} - 12(\alpha_{12} + \alpha_{13} + \alpha_{23}) + 3(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3).\end{aligned}\quad (3.5)$$

Таблица 3.2

Матрица планирования эксперимента

Номер стекла	Z1	Z2	Z3	X1	X2	X3	КЛТР·10 ⁻⁷ К ⁻¹	H, кг/мм ²
Si-1	1	0	0	0,4	0	0,6	87	617
Si-2	0	1	0	0,3	0,4	0,3	76	510
Si-3	0	0	1	0,119	0	0,881	102	572
Si-4	0,5	0,5	0	0,35	0,1	0,55	79	570
Si-5	0,5	0	0,5	0,258	0	0,747	100	554
Si-6	0	0,5	0,5	0,209	0,201	0,590	96	640
Si-7	0,333	0,333	0,333	0,27	0,139	0,591	89	537

Используя уравнение (3.4) и полученные коэффициенты β , можем представить уравнение регрессии (математической модели) в виде

$$\alpha = 87 \cdot Z_1 + 76 \cdot Z_2 + 102 \cdot Z_3 - 10 \cdot Z_1 \cdot Z_2 + 22 \cdot Z_1 \cdot Z_3 + 28 \cdot Z_2 \cdot Z_3 - 102 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3. \quad (3.6)$$

Адекватность модели проверяли по двум составам стёкол в области треугольника 1 (рис. 3.3). Эти составы синтезировались экспериментально и сравнивались с теоретическими. Относительная ошибка расчета находится в соответствии с общепринятым уровнем зна-

чимости для подобных измерений. Следовательно, уравнение регрессии (3.6) можно принять за образец расчета значения КЛТР для материала с заранее заданными свойствами.

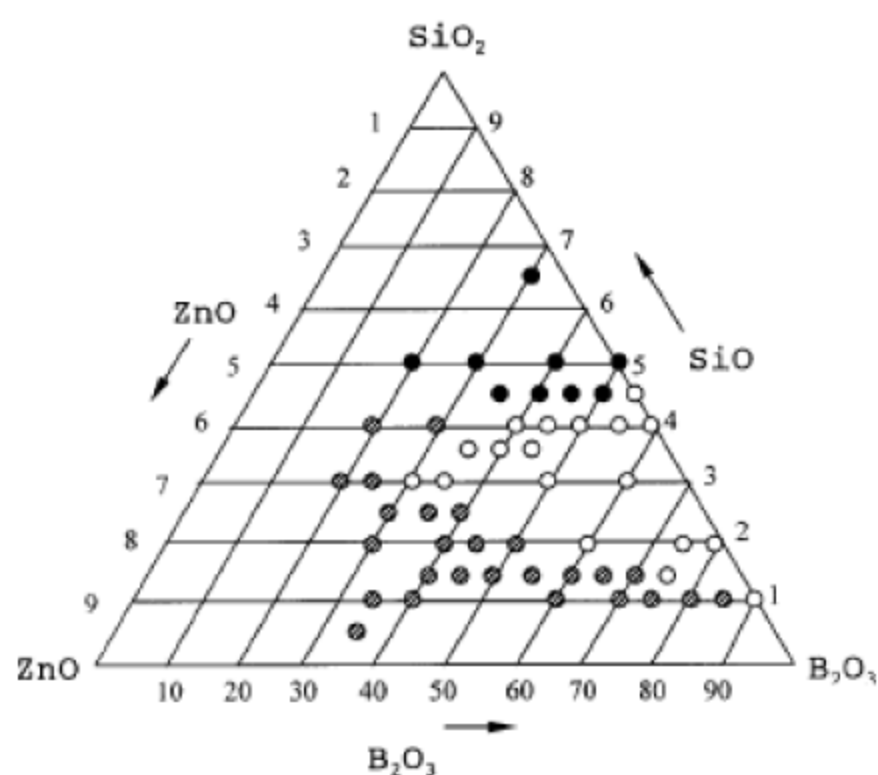


Рис. 3.2. Область стеклообразования (вес. %) в системе $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--ZnO}$; \bigcirc – прозрачное стекло, \otimes – закристаллизованное стекло, \bullet – спек

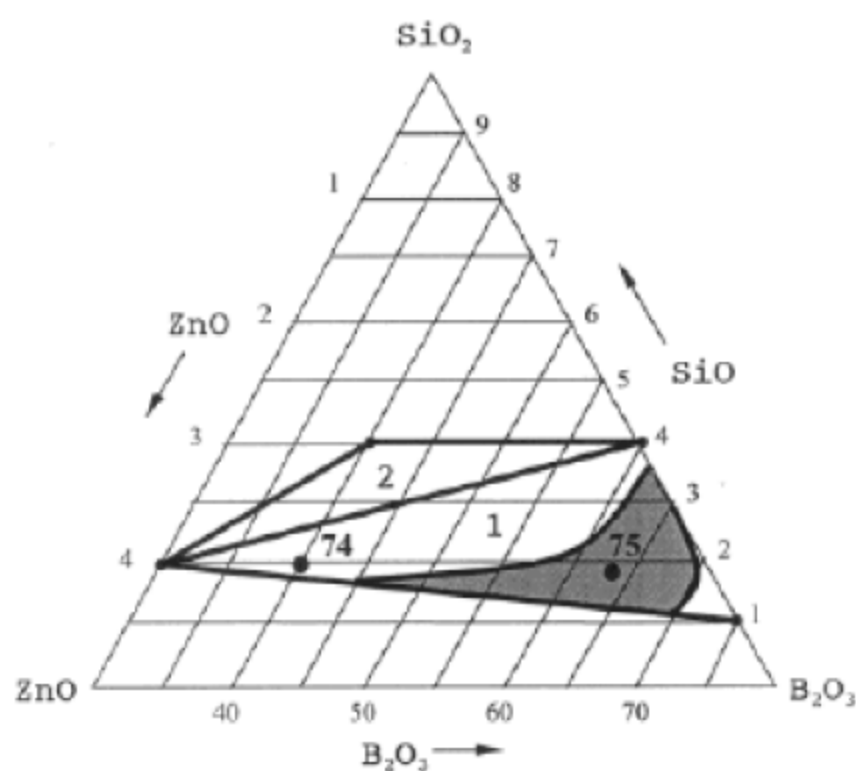


Рис. 3.3. Симплекс-центроидные планы неполного третьего порядка: заштрихованная область – $\text{КЛТР} = (87 \div 114) \cdot 10^7 \text{ K}^{-1}$

Аналогично рассчитывается уравнение регрессии для определения микротвердости заданного стекла:

$$H = 617 \cdot Z_1 + 510 \cdot Z_2 + 572 \cdot Z_3 + 26 \cdot Z_1 \cdot Z_2 - 162 \cdot Z_1 \cdot Z_3 + 396 \cdot Z_2 \cdot Z_3 - 1572 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3. \quad (3.7)$$

3.1.3. Математическая модель прессования горячепрессованных ферритов

Ферриты характеризуются высокими значениями твердости и электрического сопротивления при достаточно хороших магнитных характеристиках, что позволило занять им ведущее положение в качестве материалов для МГ.

В настоящее время в производстве сердечников МГ для устройств магнитной записи широко применяются горячепрессованные ферриты (ГПФ). Изготовление ферритов по обычной окисной технологии не дает возможности получения качественного материала, так как прессованные и затем спеченные ферриты обладают повышенной хрупкостью и пористостью, что затрудняет их механическую обработку. Качество обработанной поверхности в этом случае не превышает 11-го класса. Процесс горячего прессования характеризуется приложением внешнего давления в процессе спекания. В результате процессы формирования структуры феррита значительно ускоряются, повышается его плотность, твердость, вязкость, вследствие чего чистота поверхности изделия после обработки возрастает до 13-го класса [68].

Отметим, что вышеназванные достижения в получении плотных ГПФ с износостойкостью, превышающей в 5–10 раз износостойкость сендаста, обеспечили увеличение срока эксплуатации МГ и позволили перейти от сложных конструкций составных МГ к более дешевым и технологичным. Благодаря высокому электрическому сопротивлению (от единиц до сотен Ом/см), эффективная магнитная проницаемость остается достаточно большой на высокой частоте (до 10 МГц).

Помимо указанных электромагнитных свойств, ферриты, используемые для производства МГ, должны обеспечивать высокие механические и структурные характеристики: минимальную пористость, высокие прочность и износостойкость. Рассмотренным выше требованиям в большей степени удовлетворяют горячепрессованные Mn–Zn- и Ni–Zn-ферриты.

Объектом исследования этого подраздела является Ni–Zn-феррит горячего прессования с уменьшенным размером зерна и высокой прочностью, обеспечивающей проведение сверхтонкой обработки при изготовлении сердечников МГ (табл. 3.3) [66,69].

В результате проведенных исследований была разработана ММ процесса прессования ферритов, которая позволяет, используя набор экспериментальных данных, определить близкий к оптимальному состав ГПФ.

Основными процессами производства ферритов, влияющими на качество полученных заготовок, являются: измельчение, прессование, спекание. С целью получения прочных магнитных элементов, ис-

пользуемых в технике магнитной записи, ферритовые порошки прессуют и подвергают спеканию.

Таблица 3.3

Свойства никель-цинкового феррита

Тип материала	μ_n	КЛТР $\cdot 10^7$, K^{-1} 20÷200 °C	B_s , Тл	H_c , А/м	ρ , $\cdot 10^{-8}$ Ом·м	T_θ , °C	Микро- твер- дость по Вик- керсу, кг/мм ²	Плот- ность, г/см ³	Из- носо- стой- кость, ч
Горячепрессованный Ni–Zn-феррит (Fe ₂ O ₃ – 67,5, мол.%, NiO – 18,9, мол.%, ZnO – 13,6, мол.%)	6000	94	0,4	4,0	10^{10}	350	750	5,3	>1000

Здесь μ_n – начальная магнитная проницаемость, КЛТР – коэффициент линейного термического расширения, B_m – индукция насыщения, H_c – коэрцитивная сила, ρ – удельное электрическое сопротивление, θ – температура Кюри.

Образующиеся в результате этих процессов заготовки характеризуются определенной плотностью, формой и размером кристаллитов, размером и распределением пор, определенным способом распределения примесей и микрокомпонентов. Совокупность этих свойств составляет керамическую структуру материала, которая тесно связана с магнитными, электрическими и механическими свойствами.

Основное теоретическое уравнение прессования, выражающее связь удельного давления P относительного объема прессовки и

свойств прессматериала, представляет собой проведенный закон Гука:

$$\lg P = -m \cdot \lg \beta + \lg p_{\max}, \quad (3.8)$$

где m – показатель прессования, учитывающий природу материала и его прессовочные свойства (чем он выше, тем лучше прессуемость; отсюда вытекает и физический смысл знака минус в уравнении);

p_{\max} – предельное усилие прессования по графику кинетики уплотнения.

Рабочее удельное давление выбирают примерно на 20 % меньше предельного усилия прессования, в противном случае прессование будет сопряжено с трещинообразованием, расслоением изделий и т. п. Нахождение p и m представляет собой сложную технологическую задачу, как и применение этого уравнения на практике.

Имеется ряд эмпирических уравнений [74]:

$$\begin{cases} \Pi = a - b \lg p, \\ \gamma = a_j + b_j \lg p, \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\gamma = K \sqrt[3]{p} + \gamma_{\text{нас}}, \quad (3.10)$$

где Π , γ – соответственно пористость и кажущаяся плотность,

$\gamma_{\text{нас}}$ – насыпная масса пресс-порошка,

a , b , a_j , b_j – постоянные коэффициенты, равные

$$a_j = \left(1 - \frac{a}{100}\right) \cdot \gamma_{\text{ТВ}}, \quad (3.11)$$

$$b_j = \frac{b \cdot \gamma_{\text{ТВ}}}{100}, \quad (3.12)$$

где $\gamma_{\text{ТВ}}$ – удельная масса материала.

С помощью экспериментальных данных p , Π и γ решают систему уравнений и находят значения искомых коэффициентов. Для разных керамических материалов и их прессовочных свойств значения коэффициентов отличаются, поэтому на универсальность эти уравнения претендовать не могут. На величины коэффициентов влияют различные свойства пресс-порошков (грансостав, пластичность, сыпучесть, влажность и т. п.), характер приложения давления, выдержки при давлении, наличие смазывающих веществ, состояние поверхностей пресс-оснастки и др.

Методы построения уравнения регрессии, использующие полный факторный эксперимент, широко известны [24,64]. Входные данные берутся из матрицы планирования эксперимента, которая составляется по имеющимся экспериментальным данным.

Для каждой комбинации входных параметров фиксируется строго определенное значение выходных параметров. По этим данным рассчитывается ММ процесса в виде многочлена уравнения регрессии, представляющего собой ряд Тейлора.

Для эффективного использования метода математического планирования должны быть заранее известны основные факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на изучаемый процесс, и, кроме того, выходной параметр должен однозначно и статистически значимо определяться набором входных параметров и, по возможности, иметь ясный физический смысл.

В качестве параметра оптимизации y была выбрана относительная плотность Π изделий. Факторы, оказывающие значительное

влияние на параметр оптимизации, выбрали следующие: x_1 – удельное давление прессования, МПа; x_2 – выдержка прессовки под давлением, с; x_3 – максимальная температура обработки, °С. Для каждого из факторов установлены основной уровень и интервал варьирования (табл. 3.4) [71].

Таблица 3.4

Значения переменных

Фактор	x_1 , МПа	x_2 , с	x_3 , °С
Основной уровень	112,286	3	1123
Интервал варьирования	45,895	2	70
Верхний уровень	158,181	5	1193
Нижний уровень	66,391	1	1053

На основе разработанного алгоритма построения ММ получили результат:

а) в натуральном виде

$$\begin{aligned} \Pi = & 9,61 - 0,08(x_1 - 112,286) - 2,9(x_3 - 1123) + 0,4(x_1 - 112,286) \times \\ & \times (x_3 - 1123) + 0,41(x_3 - 1123)^2 - 0,5(x_2 - 3); \end{aligned} \quad (3.13)$$

б) в приведенном виде

$$\Pi = 9,61 - 3,8X_1 + 7,63X_1X_3 + 3,72X_3^2 - 0,74X_2, \quad (3.14)$$

где $X_1 = (x_1 - 112,3) / 43,3$; $X_2 = (x_2 - 3) / 1,88$; $X_3 = (x_3 - 1123) / 103,8$.

Опыты, заданные матрицей планирования, проводились в случайной последовательности, т.е. рандомизированно во времени. По-

добный метод исследований позволил исключить влияние систематических ошибок на результат эксперимента.

3.2. Алгоритм формирования математической модели синтеза стекловидных диэлектриков для спаев стекла с титаном

Оптимальным для реализации модуля подбора функции $f_j(x_i)$ (3.1) – (3.3) является эвристический алгоритм определения соответствия вектора x_i эмпирической формуле.

На начальном этапе весь диапазон изменения величины x разбивают на k равных интервалов длиной Δx , а все точки, попавшие в интервал с номером j , относят к его середине x_j .

Для каждого интервала j вычисляют среднее арифметическое значение:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_j} y_{j,i}, \quad (3.15)$$

где x_j – число точек в интервале с номером j .

Затем последовательно соединяют точки с координатами (x_j, \bar{y}_j) отрезками прямых линий. Полученная ломаная линия – это эмпирическая линия регрессии (рис. 3.4).

Элементарные формулы $f_j(x_i)$ получают методом наименьших квадратов [72]. Сущность метода заключается в том, что путем варьирования коэффициентов подбираются такие их значения, которые

минимизируют сумму квадратов отклонений расчетных значений y от экспериментальных.

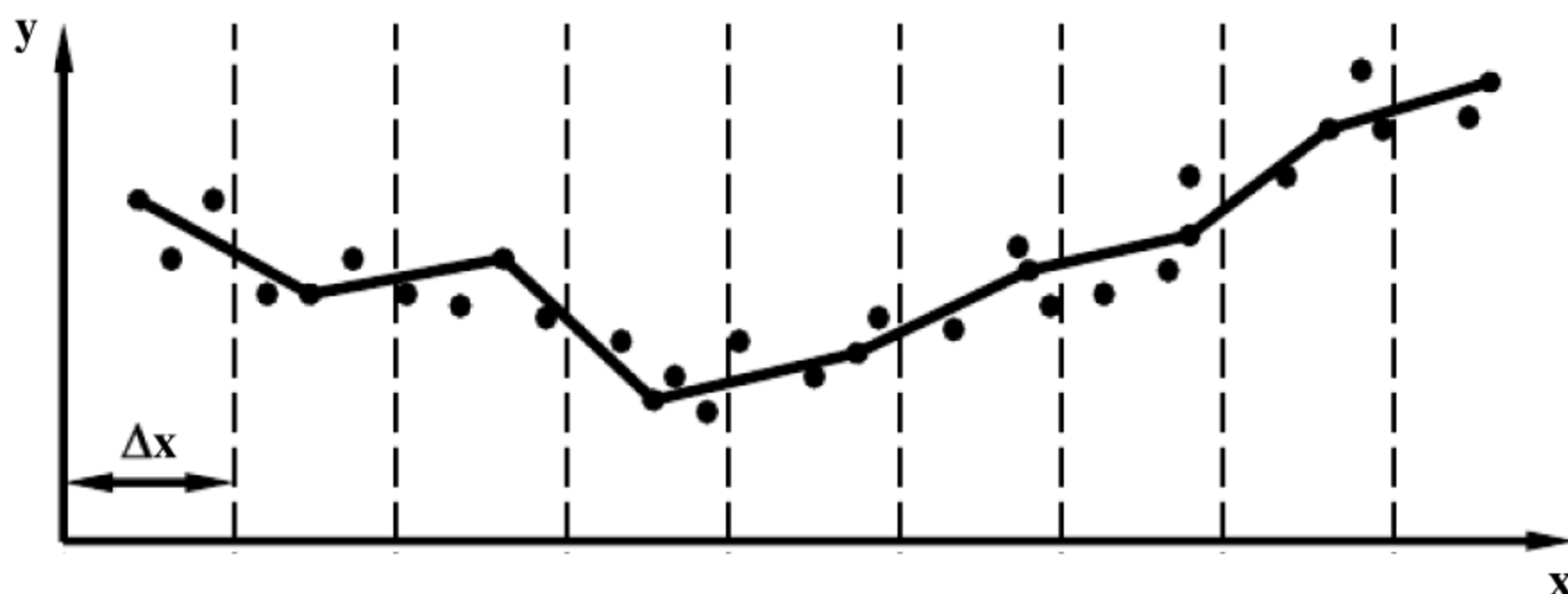


Рис. 3.4. Эмпирическая линия регрессии

Например, для уравнения линейной регрессии $y = a_0 + a_1x$ коэффициенты a_0 и a_1 определяются формулами

$$a_0 = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i - a_1 \sum_{i=1}^n x_i \right); \quad a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i - n \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad (3.16)$$

здесь n – количество экспериментальных составов.

Используя метод наименьших квадратов, можно описать уравнение регрессии любой элементарной зависимости [72].

Качество уравнения регрессии оценивают по его прогнозирующей способности. Уравнение хорошо прогнозирует экспериментальные данные, т.е. уравнение адекватно этим данным, если расхожде-

ния между расчетными и экспериментальными значениями находятся в допустимых пределах.

Существует несколько способов проверки адекватности уравнения регрессии. Например, для этих целей можно использовать корреляционное отношение η и среднюю относительную ошибку прогнозирования ε (в %), которые рассчитываются по следующим формулам:

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{\text{э},i} - y_{p,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{\text{э},i} - \bar{y})^2}}, \quad (3.17)$$

$$\varepsilon = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{\text{э},i} - y_{p,i}}{y_{\text{э},i}} \right|, \quad (3.18)$$

где $y_{\text{э}}$, y_p и \bar{y} – экспериментальное, расчетное и среднее значения величины y ; n – количество экспериментальных значений y , используемых для проверки адекватности.

Таким образом, был разработан эвристический алгоритм формирования ММ зависимости свойств неорганических стекловидных диэлектриков от их состава [73] (структурная схема представлена на рис. 3.5):

Шаг 1. Выбор вида зависимости. По цифровым данным вектора x_i эвристическим способом подбирается вид искомой зависимости. В базе данных реализованного алгоритма записаны все

элементарные зависимости и выражения для определения коэффициентов уравнений регрессии.

Шаг 2. Подбор функции. Определяется количество элементарных зависимостей, входящих в искомую зависимость, которая является целевой функцией алгоритма, а также формируется порядок переменных функции и способ формирования выражений для определения коэффициентов. Если получен отрицательный результат при переборе всех зависимостей, то выдается предложение изменить количество элементарных зависимостей для уменьшения дискретизации функции итоговой функции, и алгоритм начинает работу сначала. В этом случае переход на шаг 1, если нет, то на шаг 3.

Шаг 3. Проверка гипотезы о наличии данного вида зависимости. С помощью формул (3.17) – (3.18) полученная функция тестируется на присутствие данного вида функции. Если да – шаг 5, нет – шаг 4. Погрешность задается в начале работы алгоритма. Начальные значения коэффициентов, а также шаг перебора и интервал определяются алгоритмом в процессе работы. Для этого находятся 2 значения коэффициента, которые находятся по разные стороны от исследуемой зависимости, после этого определенный интервал разбивается на необходимое количество шагов. Значения шага алгоритм может модифицировать во время работы для нахождения оптимального или близкого к оптимальному решению.

Шаг 4. Проверка: Все ли виды зависимостей перебраны? В случае, если тестирование выдает отрицательный результат, из базы данных выбирается следующий вид зависимости и осуществляется

переход на начало алгоритма (шаг 1). Если результат положителен – на шаг 7.

Шаг 5. Проверка адекватности полученного уравнения регрессии. С помощью метода наименьших квадратов (3.18) проверяются погрешности вывода итогового уравнения регрессии. Если они удовлетворительны, то переход на шаг 6, если нет – на шаг 2.

Шаг 6. Запись уравнения в базу данных. Осуществляется запись уравнения регрессии в базу данных итоговой ММ. После записи уравнения в базу данных проводится анализ полученного уравнения на возможность уменьшения погрешности для наиболее точного описания функции. При этом проводятся следующие варианты анализа:

1) изменение коэффициентов элементарных зависимостей в сторону незначительного уменьшения и увеличения для получения наиболее точных их значений. Интервал и шаг изменения определяются алгоритмом исходя из первоначальных значений;

2) увеличение и уменьшение количества элементарных зависимостей на одно уравнение и сравнение с полученным результатом. Если результат получается более удовлетворительным, то алгоритм запускается с определенным количеством элементарных зависимостей сначала. Переход на шаг 1. Если лучших вариантов не существует, то переход на шаг 8.

Шаг 7. Зависимость не формализуема. Вывод критического сообщения.

Шаг 8. Конец.

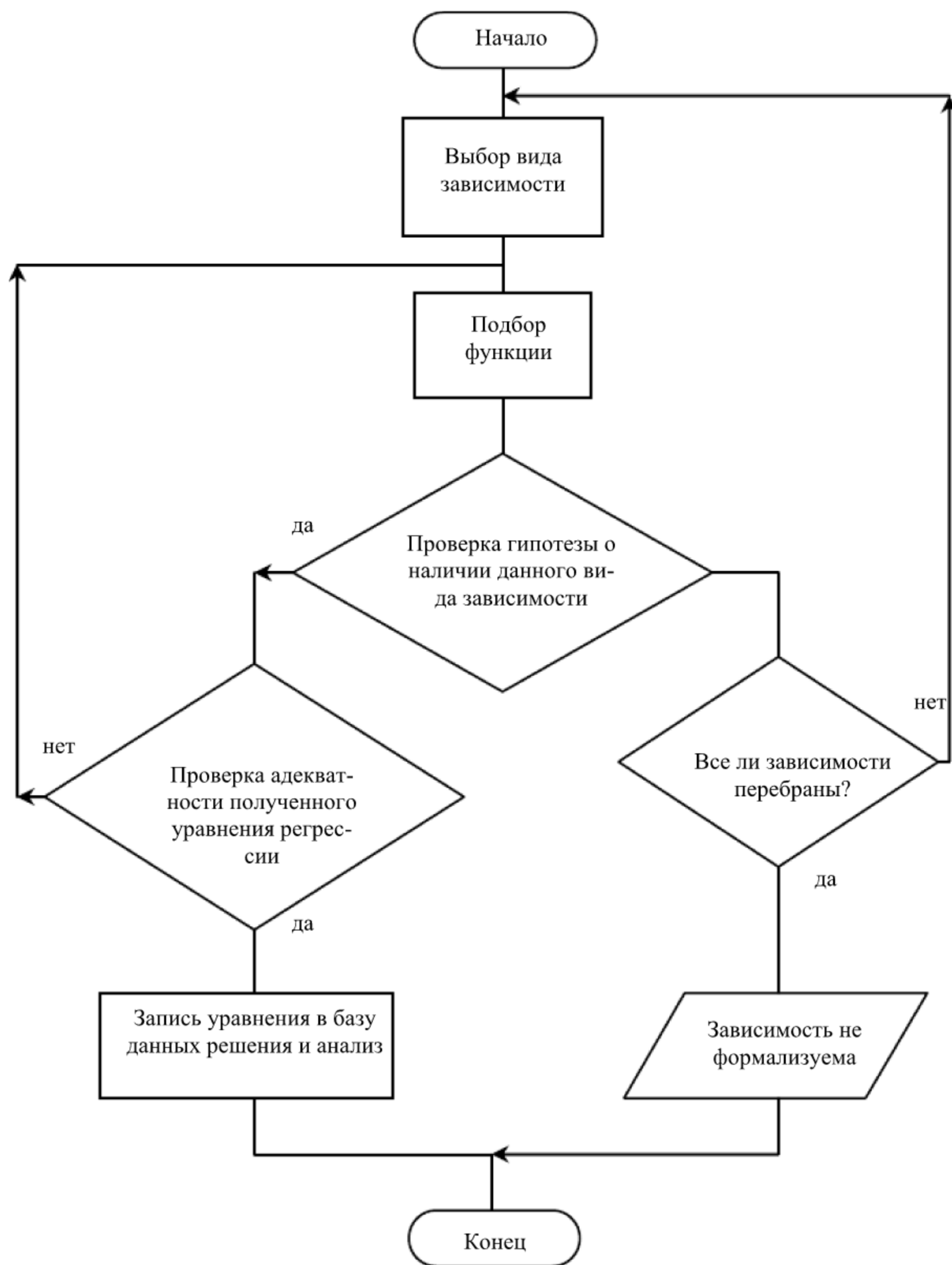


Рис. 3.5. Структурная схема эвристического алгоритма формирования математической модели свойств неорганических диэлектриков от их состава

3.3. Автоматизированные измерительные комплексы для контроля свойств магнитных сплавов

Свойства материалов, которые применяются как при разработке МГ, так и в процессе их технологического контроля, измеряются зачастую морально устаревшими приборами с низкой степенью автоматизации. В связи с чем образовался разрыв между новыми разработками материалов и устаревшими методами измерения их свойств.

В связи с быстрым развитием вычислительной техники появилась возможность эффективной математической обработки данных измерений, но в отрыве от процесса автоматизации самих измерений это дает немного [74]. Поэтому как на стадии выбора комплектующих материалов для изготовления МГ, так и при тестировании пробных образцов МГ, важным является автоматизированный контроль проводимых исследований, позволяющий оценить все необходимые характеристики образцов.

С целью автоматизации процесса измерения параметров магнитных материалов, достижения возможности инвариантной их обработки и представления результатов разработан автоматизированный измерительный комплекс (АИК) контроля магнитных свойств магнитотвёрдых сплавов [75 – 77].

Упрощенная схема комплекса представлена на рис. 3.6.

В автоматизированный комплекс, показанный на рис. 3.6, входят следующие элементы: 1 – тиристорный преобразователь; 2 – электромагнит; 3 – измерительная катушка; 4 – образец; 5 – датчик Холла; 6 – микровеберметр; 7 – усилитель; 8 – печатающее уст-

ройство; 9 – интерфейсное устройство; 10 – цифроаналоговый преобразователь; 11, 12 – коммутаторы; 13, 14 – аналого-цифровые преобразователи; 15 – дисплей; 16 – графопостроитель; 17 – ЭВМ.

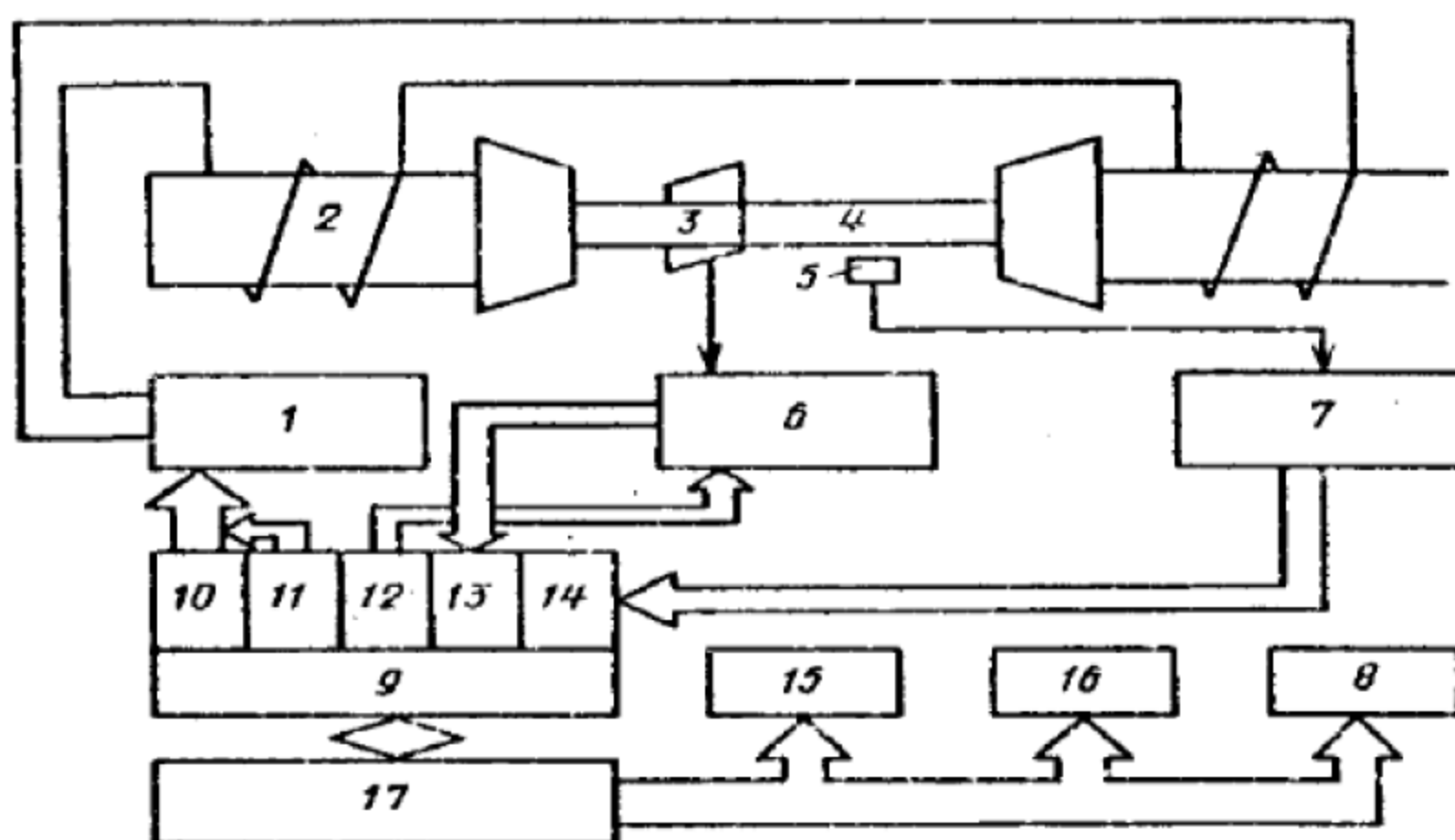


Рис. 3.6. Упрощенная схема автоматизированного комплекса контроля магнитных свойств магнитно-твердых материалов

Исследуемый образец 4 помещается в рабочее пространство электромагнита 2, который питается от тиристорного преобразователя 1. Датчиком намагниченности является измерительная катушка 3, датчиком напряженности магнитного поля – датчик Холла 5, помещаемый в непосредственной близости от образца. Сигналы от измерительной катушки и датчика Холла соответственно через интегрирующий микровеберметр 6 и усилитель 7 поступают на вход двух аналогово-цифровых преобразователей 13 и 14, входящих в состав

согласующего интерфейсного устройства 9, связанного с ЭВМ 17. Коммутатор 12 служит для автоматической установки микроверметра на нуль и изменения предела измерения. Через интерфейсное устройство сигналы поступают в ЭВМ, обрабатываются, и в соответствии с программой через цифроаналоговый преобразователь 10 и коммутатор 11 плавно изменяется напряжение тиристорного преобразователя и тока в обмотках электромагнита. Обработанные результаты выводятся на дисплей 15 и графопостроитель 16, а при необходимости и на печатающее устройство 8.

Комплекс позволяет в режиме медленно меняющегося поля производить измерения кривых намагничивания и возврата, семейство частных и полную петлю гистерезиса, а также автоматически размагничивать образцы. На рис. 3.7 и 3.8 приведены конечные результаты измерений, полученных на графопостроителе комплекса. Одновременно до 12-ти основных показателей выводятся на печатающее устройство. При желании можно получить распечатку координат всех точек петли гистерезиса.

Разработаны 10 вариантов программ измерения, накопления, обработки информации и вывода ее в графическом и цифровом виде. Решена проблема получения результатов измерений без скомпенсированной катушки как в координатах индукция – поле, так и в координатах намагниченность – поле.

Работа комплекса полностью автоматизирована, единственной ручной операцией является установка образца в измерительную вставку и ввод его сечения через клавиатуру в ЭВМ. Длительность

измерения полной петли гистерезиса с установкой образца составляет 1-1,5 мин. При замене электромагнита на соленоид и смене источника питания комплекс позволяет производить измерения магнитно-мягких материалов.

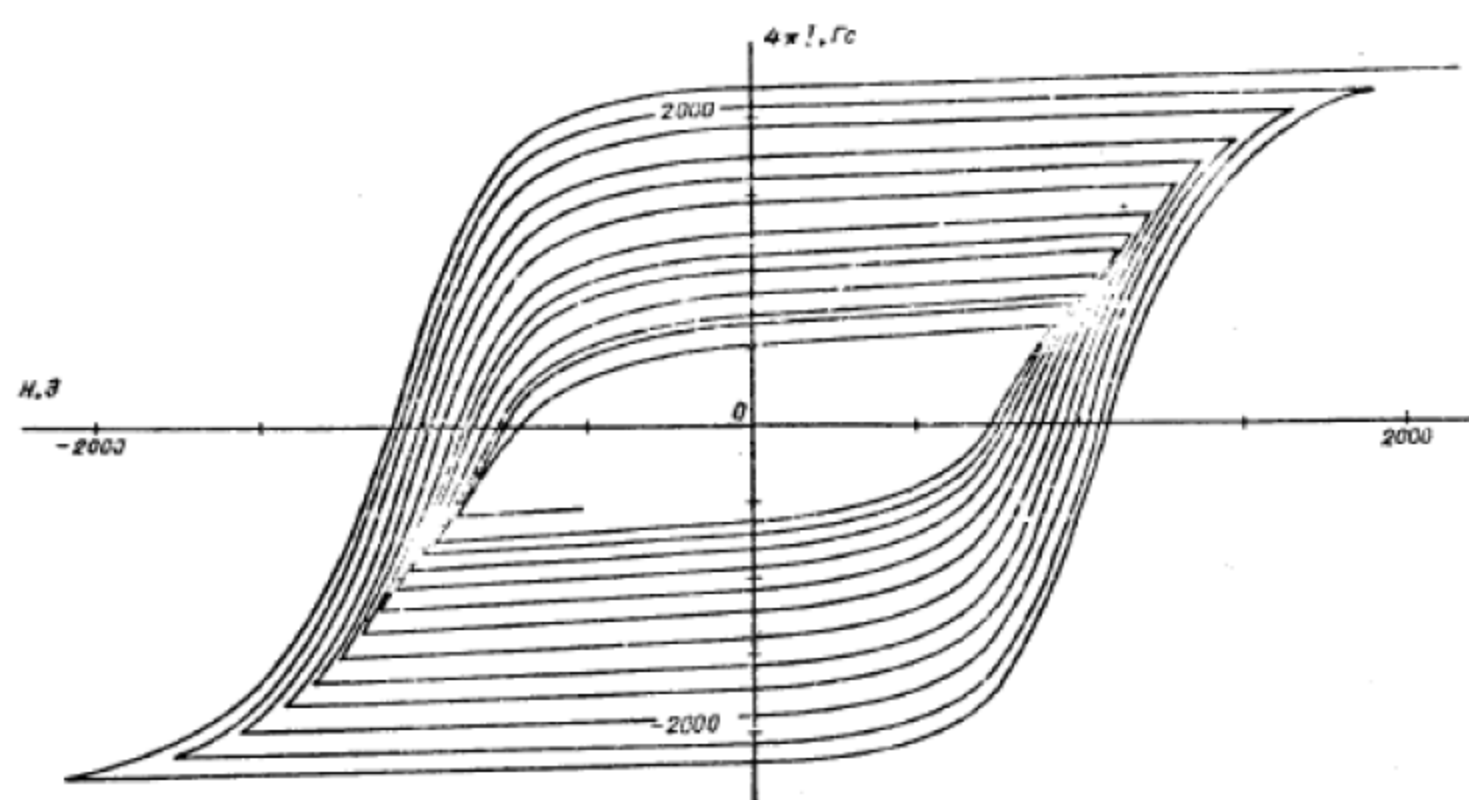


Рис. 3.7. Семейство частных циклов, выведенных на графопостроитель комплекса

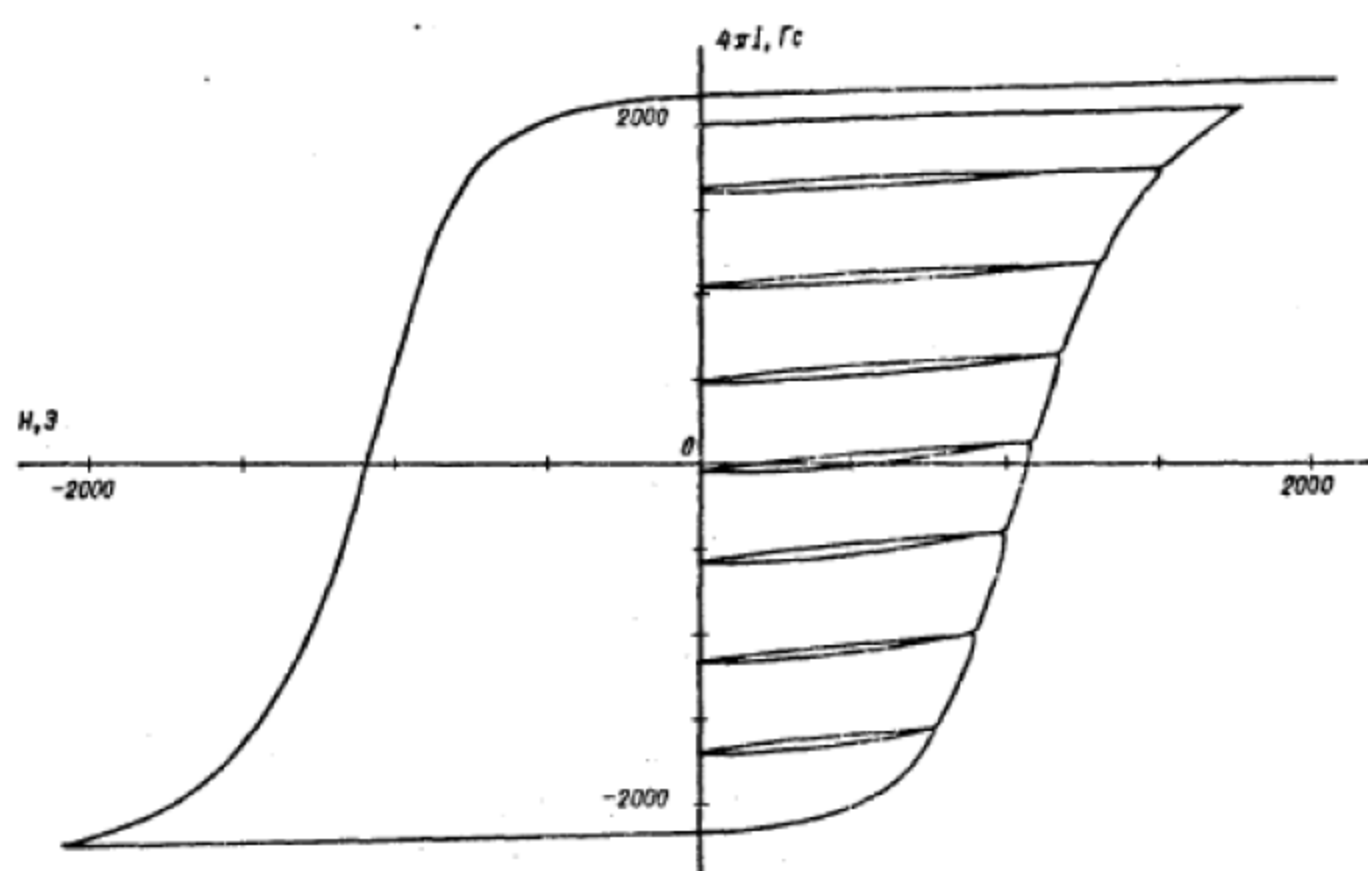


Рис. 3.8. Семейство кривых возврата

Указанный комплекс создан с ориентацией на IBM PC с соответствующими периферийными устройствами. Наиболее удобно, когда в комплекс входят приборы с единым интерфейсом, однако это необязательно и возможно применение нескольких типов интерфейсов. Интерфейс IEEE-488 в комплексе обеспечивает взаимную информационную связь цифровых измерительных приборов и преобразователей информации, устройств управления, различных генераторов, ЗУ, дисплеев и т.д. Указанный интерфейс обладает рядом преимуществ: простота структуры сигнальных шин и протокола связи, возможность связи между устройствами различного быстродействия, одновременный прием данных группой устройств и т. д.

Создание измерительного комплекса на базе ПЭВМ позволяет оперативно менять структуру его работы, создать банки данных по образцам, при этом в банки данных могут быть записаны не только конкретные физические, но и технологические параметры, такие как: степень деформации, температура отжига, номер плавки и т. д. Такой банк данных по образцам был создан.

Значительное количество образцов позволило помимо оперативного измерения магнитных свойств сформировать банк экспериментальных данных. Созданные программы позволяют сортировать данные по степени возрастания или убывания любого параметра, одновременно задавая изменение остальных в известных пределах.

Для устройств графического отображения информации разработан пакет программ, позволяющий получать графическую зависимость двух (плоский график) и трех (объемный график) любых пара-

метров друг от друга. На рис. 3.8 приведен трехмерный график зависимости магнитной энергии $(BH)_{\max}$ от значений остаточной магнитной индукции B_r и коэрцитивной силы H_c . На графике видно, что при данной технологии увеличение только H_c или B_r не приводит к увеличению магнитной энергии.

Для более точного численного значения любого параметра разработана программа "топография". Она позволяет получать на плоскости в декартовой системе изолинии третьего параметра, т. е. производить сечение трехмерной поверхности плоскостями, параллельными плоскости XOY, отстоящими на равном расстоянии друг от друга. Таковы только некоторые возможности комплекса.

Опыт работы с комплексом позволяет сформулировать основные требования, предъявляемые к ЭВМ и ее периферии. Как показывает практика, средний размер программы измерения и накопления информации находится в пределах 20 Мбайт. К этому следует добавить достаточно большой объем памяти (78 Мбайт) для составления программ обработки информации и представления ее в графическом виде.

Для контроля параметров магнитной ленты для звуковой и видеозаписи были созданы измерительные автоматизированные комплексы, аналогичные указанному на рис. 3.6, при этом такие устройства, как тиристорные преобразователи, электромагниты, измерительные катушки и датчики были заменены соответствующими генераторами, магнитными головками и измерительными вольтметрами.

Измерение параметров (уровня шума, отдачи, частотной характеристики и др.) видеолент различных типов производилось на модернизированном видеомагнитофоне. Модернизация состояла в том, что в процессе измерений видеомагнитофон автоматически включался в тот или иной режим по нужной программе, с генератора на вход магнитофона подавался соответствующий сигнал записи и синхросигналы. При последующем воспроизведении с МГ снимался сигнал воспроизведения и через управляемый анализатор и АЦП сигнал вводился в ЭВМ.

Вариации сигналов записи по частоте и амплитуде в комплексе с выходными сигналами дают информацию о параметрах магнитной ленты как по звуковому, так и по видеоканалам.

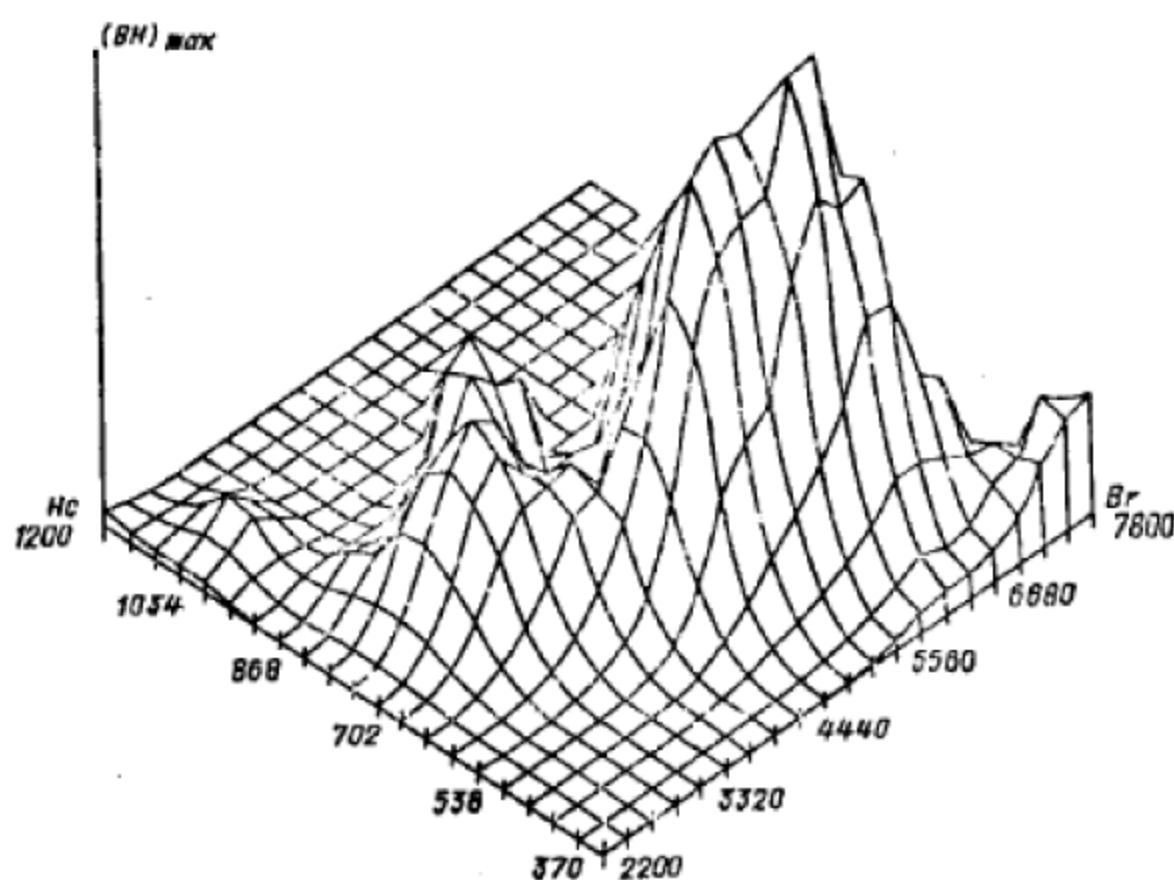


Рис. 3.9. Трехмерная поверхность зависимости магнитной энергии, остаточной индукции и коэрцитивной силы серии образцов постоянных магнитов

Аналогичным образом измеряются параметры звуковой магнитной ленты, где в качестве основного средства используется магнитофон. Если магнитофон имеет "сквозной канал" (раздельные головки записи и воспроизведения), то операции измерения параметров можно проводить одновременно с записью измерительных сигналов (не перематывая магнитную ленту).

3.3.1. Процедуры моделирования системы «носитель информации – магнитная головка»

В процессе эксплуатации аппаратуры магнитной записи различного назначения с течением времени происходит нарушение нормальной работы, при этом ухудшается качество выходного сигнала и точность передаваемой информации. Контактная пара «головка – лента» является чрезвычайно важным фрикционным узлом, как бы задающим «тон» в дальнейшем прохождении качественного выходного сигнала. Цель анализа работы контактной пары «носитель информации – магнитная головка» была достигнута с помощью алгоритма, определяющего минимальную интенсивность износа МГ в целом.

На процессы трения и износа в области взаимодействия МГ с лентой влияет множество различных факторов. Преобладающими являются: физико-механические свойства лент и материалов МГ, микрогеометрия рабочих поверхностей лент и головок, параметры и режим работы лентопротяжных механизмов (ЛПМ), распределение

давлений на границе контакта, а также окружающие условия среды. Основные результаты работы получены при исследовании специальных образцов и макетов МГ. При испытании образцов применены различные типы отечественных и зарубежных магнитных лент, в том числе металлические и биметаллические ленты [78,79].

Согласно статистическим данным, наименьшей надежностью обладает контактная пара «магнитная головка – лента». В результате трения лент по МГ изменяется микро- и макрогеометрическая картина контакта пары «головка – лента», совершается переход от одного вида нарушения фрикционной связи к другой.

Для анализа вида фрикционного контакта найдены значения давлений в паре «головка – лента», определены физико-механические, фрикционные и усталостные свойства материалов пары, а также параметры микрорельефа рабочих поверхностей [80,81]. Очевидно, что распределение давления на поверхности контакта «головка – лента» (при плоском лентоприжиме), с учетом сил трения, подчиняется следующему закону:

$$P(x) = \frac{4}{R_r \sqrt{f^2 T_1^2 + T_2^2}} (x + a)^{0,56} (b - x)^{0,44}, \quad (3.19)$$

где R_r – радиус головки, f – коэффициент трения пары, T_1 , T_2 – упругие постоянные, a и b – размеры площадки контакта.

На рис. 3.10 представлена схема контакта поверхностей магнитной головки и биметаллической ленты.

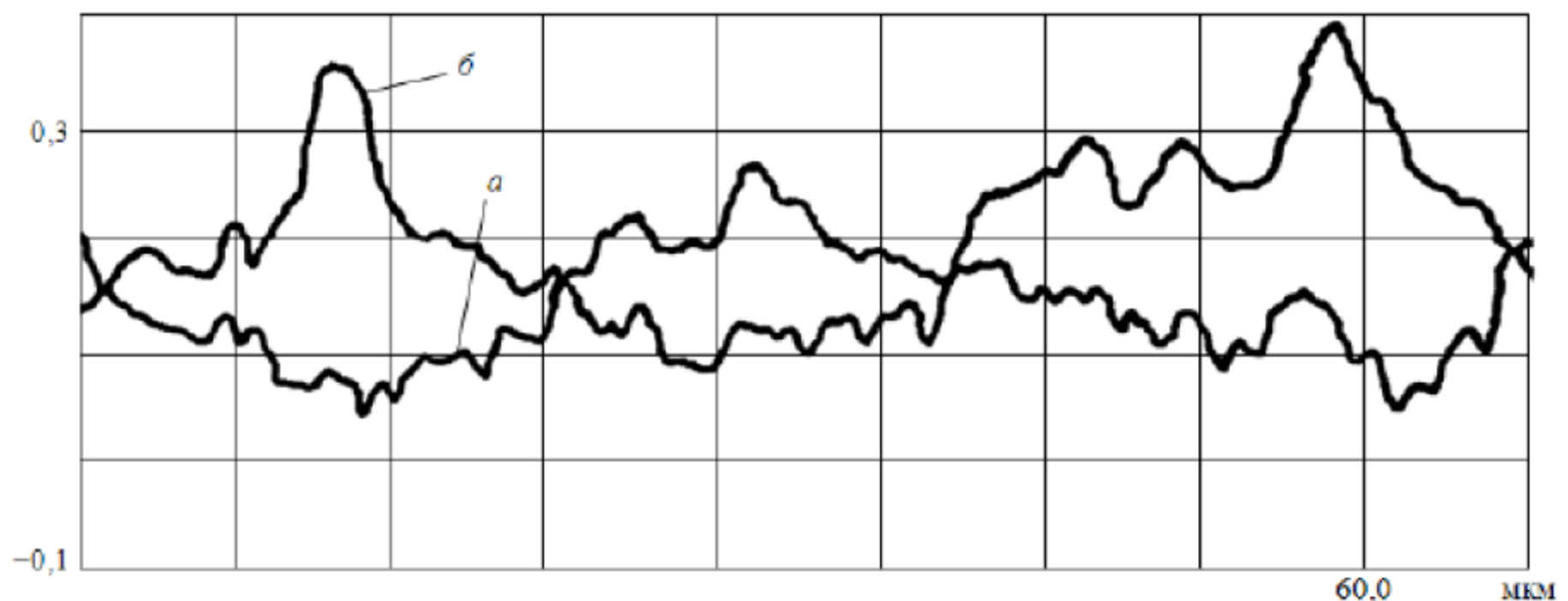


Рис. 3.10. Схема контакта поверхностей «головка – лента»:

а – поверхность головки, б – поверхность биметаллической ленты

Результаты оценки вида контакта для материалов головки с биметаллической лентой показывают, что имеет место фрикционный контакт, указывающий на преобладание упругих деформаций в зоне касания поверхностей.

Полученные результаты по анализу вида контактирования позволяют вывести расчетные зависимости износа материалов МГ биметаллическими лентами.

Для вывода расчетных формул интенсивности износа головок при работе с биметаллическими лентами по экспериментальным зависимостям линейного износа от величины контактного давления с помощью метода наименьших квадратов определены значения параметров « t » кривых усталости для материалов головок. С учетом полученных значений параметра « t » найдено уравнение для расчета интенсивности износа головок (материал – пермаллой):

$$I = C_y \left(\frac{\sqrt{\frac{p}{2\pi\nu R_r}}}{K_\nu} \right)^{2,2} \nu^{-2,8} \left(\frac{H_{\max}}{R_b} \right)^{1,9} \left(\frac{K_{\mu f}}{\sigma_0} \right)^5 \alpha_y, \quad (3.20)$$

где p – нормальная нагрузка, действующая на головку (на единицу ширины ленты); ν – коэффициент эластичности Кирхгофа, R_r – радиус кривизны МГ; H_{\max} , R_b – параметры микрогеометрии поверхности ленты; σ_0 – экстраполированное значение усталостной кривой для однократного нагружения материала головки; α_y – коэффициент, учитывающий упругие свойства ленты ($\alpha_y = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}$); C_y – коэффициент, определяемый параметрами микрогеометрии ленты и усталостными характеристиками материала головки; K_ν – коэффициент, определяемый параметрами микрогеометрии ленты; $K_{\mu f}$ – коэффициент, определяемый фрикционными и упругими свойствами контактирующих поверхностей.

3.3.2. Динамическое взаимодействие магнитной головки с лентой

На основе экспериментальных исследований используем математический аппарат для получения уравнений, определяющих износ МГ [82 – 84].

Динамическая система «головка – лента» представляется как система материальных точек, взаимосвязанных друг с другом, посту-

пательное движение которых рассматривается с учетом того, что масса ленты равна приведенной массе узла. Таким образом, исследуемую систему можно представить как систему поступательного движения масс, связанных с помощью упругой магнитной ленты, оказывающей сопротивление растяжению и находящейся под действием приложенных извне сил. При описании исследуемой модели дифференциальными уравнениями для упрощения анализа и расчетов учитывались только тангенциальные составляющие упругих и диссипативных параметров контакта «головка – лента» (C_k, γ_k) [85].

Тогда систему дифференциальных уравнений, описывающую динамическую модель «головка – лента», можно представить в виде [85]

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 + 2(\gamma + \gamma_k)\dot{x}_1 + C_k x_1 - \gamma\dot{x}_2 - Cx_2 = \gamma\dot{x}(t) + Cx(t) - 2C\Delta - \gamma_k v \cdot fN, \\ -\gamma\dot{x}_1 - Cx_1 + \gamma\dot{x}_2 + Cx_2 = -C\Delta, \end{cases} \quad (3.21)$$

где C, C_k – коэффициенты жесткости ленты и контакта; γ_i, γ_k – коэффициенты демпфирования; m – приведенная масса ленты; $x(t)$ – продольные колебания за головкой; x_1, x_2 – продольные колебания ленты; v – скорость движения.

Для определения дифференциального уравнения, связывающего продольные колебания ленты, измеренные перед МГ, с продольными колебаниями ленты за головкой, на основе полученной системы (3.21) вычислялась ее передаточная матрица, с учетом того, что входной сигнал выражает параметр $x(t)$, а выходной – координату x_2 . По полученной передаточной матрице было найдено дифференциальное уравнение между $x(t)$ и x_2 [85]:

$$m\ddot{x}_2 + (\gamma^2 + \gamma\gamma_k + mC)\ddot{x}_2 + (2\gamma C + \gamma C_k + \gamma_k C)\dot{x}_2 + (C^2 + CC_k)x_2 = \\ = \gamma^2 \ddot{x}(t) + 2\gamma C \dot{x}(t) + C^2 x(t) + aC - (2C + C_k)\Delta C. \quad (3.22)$$

Для определения коэффициентов дифференциального уравнения использован метод наименьших квадратов. В результате преобразований уравнение (3.22) приводится к виду

$$\left(\frac{\gamma}{C} \ddot{x}_2 + \dot{x}^2 \right) A_2 + \left(x_2 - \frac{\gamma^2}{C^2} \ddot{x}_2 \right) A_3 = \\ = m\ddot{x}_2 - mC\ddot{x}_2 + \gamma^2 \ddot{x}(t) + 2\gamma C \dot{x}(t) + C^2 x(t) + aC - (2C + C_k)\Delta C, \quad (3.23)$$

где $A_1 = \gamma^2 + \gamma\gamma_k + mC$; $A_2 = 2\gamma C + \gamma C_k + \gamma_k C$; $A_3 = C^2 + CC_k$.

Уравнение (3.23) заменяем уравнением для корреляционных функций:

$$A_3 \left[\frac{\gamma}{C} \ddot{K}_{x_2} \dot{x}(\tau) + \dot{K}_{x_2} x(\tau) \right] + A_2 \left[K_{x_2} x(\tau) - \frac{\gamma^2}{C^2} \ddot{K}_{x_2} \dot{x}(\tau) \right] = \\ = m\ddot{K}_{x_2} x(\tau) - mC\ddot{K}_{x_2} x(\tau) + \gamma^2 \dot{K}_{xx}(\tau) + 2\gamma C \dot{K}_{xx}(\tau) + C^2 K_{xx}(\tau). \quad (3.24)$$

Так как корреляционные функции вычисляются по центрированным реализациям процесса, то среднее значение $x(t)$ равно нулю. Обозначим коэффициент при A_2 через $\varphi_1(\tau)$, при A_3 через $\varphi_2(\tau)$, а правую сторону уравнения через $\psi(\tau)$.

Тогда уравнение (3.24) запишется следующим образом:

$$\varphi_1(\tau)A_2 + \varphi_2(\tau)A_3 = \psi(\tau). \quad (3.25)$$

Задача сводится к отысканию коэффициентов A_2 и A_3 по известным в m точках значениям корреляционных функций $K_{x_2x}(\tau)$, $K_{xx}(\tau)$ и их производных при условии, что отклонение функции $\psi(\tau)$, вычис-

ленной в любой точке от значения той же величины, определенной по формуле (3.25), будет минимальным.

Отметим, что за меру отклонения принималась сумма квадратов отклонений E_m , и наилучшими коэффициентами считались те, для которых сумма квадратов отклонений сводилась к минимуму:

$$E_m = A_2 \varphi_1(\tau_m) + A_3 \varphi_2(\tau_m) - \psi(\tau_m). \quad (3.26)$$

С учетом необходимых условий экстремума функции нескольких переменных решалась нормальная система уравнений для отыскания коэффициентов, в результате чего решение системы можно представить в виде

$$A_2 = \frac{\sum_{m=1}^m \varphi_2^2(\tau_m) \sum_{m=1}^m \psi(\tau_m) \varphi_1(\tau_m) - \sum_{m=1}^m \varphi_1(\tau_m) \varphi_2(\tau_m) \sum_{m=1}^m \psi(\tau_m) \varphi_2(\tau_m)}{\sum_{m=1}^m \varphi_1^2(\tau_m) \sum_{m=1}^m \varphi_2^2(\tau_m) - 2 \sum_{m=1}^m \varphi_1(\tau_m) \varphi_2(\tau_m)}, \quad (3.27)$$

$$A_3 = \frac{\sum_{m=1}^m \varphi_1^2(\tau_m) \sum_{m=1}^m \psi(\tau_m) \varphi_2(\tau_m) - \sum_{m=1}^m \varphi_1(\tau_m) \varphi_2(\tau_m) \sum_{m=1}^m \psi(\tau_m) \varphi_1(\tau_m)}{\sum_{m=1}^m \varphi_1^2(\tau_m) \sum_{m=1}^m \varphi_2^2(\tau_m) - 2 \sum_{m=1}^m \varphi_1(\tau_m) \varphi_2(\tau_m)}. \quad (3.28)$$

По полученным значениям корреляционных и взаимокорреляционных функций определены параметры жесткости и демпфирования. В результате расчета установлено некоторое увеличение коэффициентов жесткости и демпфирования в случае изношенной МГ, обусловленное увеличением контурной площади касания и давлений на краях контактной площадки, что, в свою очередь, влияет на изменение выходных параметров. В связи с этим предложены рекоменда-

ции по выбору оптимальной геометрии МГ, материалов и конструкций лентоприжимных устройств [59,60].

3.3.3. Разработка эвристического алгоритма определения оптимального взаимодействия МГ с носителем информации

Для получения минимальной интенсивности износа МГ [86] был разработан самонастраивающийся алгоритм определения оптимального взаимодействия МГ с носителем информации. Структурная схема алгоритма представлена на рис. 3.11.

Шаг 1. Определение факторов, влияющих на интенсивность износа головки. По введенным пользователем входным данным, определяющим взаимодействие МГ с носителем информации, система определяет, какие факторы влияют на интенсивность износа головки.

Шаг 2. Эвристическая обработка входных данных и формирование структуры оптимизационного алгоритма, настройка его параметров. Используя формулы (3.19) и (3.20), экспертные данные и набор эмпирических правил, описывающих действия, которые необходимо выполнить для получения оптимального взаимодействия МГ с носителем информации, система определяет целевую функцию и структуру оптимизационного алгоритма, а также параметры его настройки.

Шаг 3. Запуск сформированного алгоритма и вывод полученного решения.

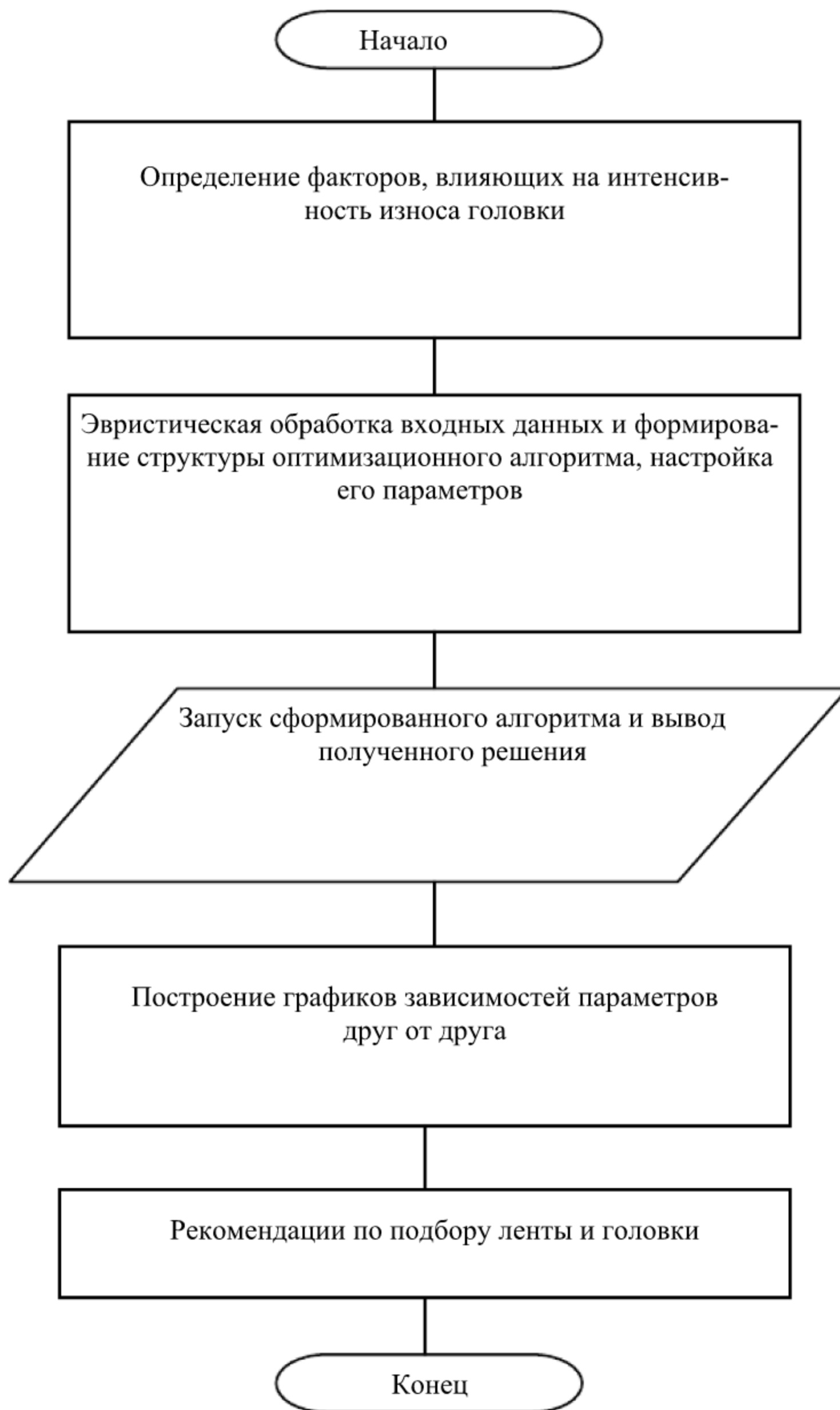


Рис. 3.11. Структурная схема разработанного алгоритма определения оптимального взаимодействия «головка – лента»

Шаг 4. Построение графиков зависимостей параметров друг от друга. Строятся графики зависимостей параметров, которые были оптимизированы, от влияющих на них факторов. Построение графиков ведется от начальных данных, введенных пользователем в начале работы системы. Тем самым показывается путь оптимизации параметров.

Шаг 5. Рекомендации по подбору ленты и головки. В конце работы система дает рекомендации по изменению параметров МГ и носителя информации для получения их оптимального взаимодействия. Данные выводы строятся на основе экспертных правил, хранящихся во внутренней базе данных системы.

Шаг 6. Конец.

По результатам экспериментальных исследований проведено сравнение с данными расчета по формуле (3.19). Показано, что интенсивность износа головок при трении биметаллической лентой, найденная аналитически, находится в пределах доверительных границ экспериментальных результатов изнашивания при доверительной вероятности 0,9.

3.4. Применение методов генетического поиска для определения оптимальных характеристик магнитных головок

В настоящее время генетические алгоритмы (ГА) – это наиболее активно используемый механизм поиска оптимальных решений [87].

Преимуществами ГА по сравнению с другими методами оптимизации являются:

1) простота структуры обрабатываемых данных об объекте, а также четкость структуры алгоритма, что обуславливает объектно-ориентированный подход, который является основой ГА;

2) общая структура сформированных данных и структура алгоритма для различных целей, отличающиеся для разного рода поставленных задач лишь наполнением (структурой хромосом и различными генетическими операторами). Данное свойство ГА ставит его в разряд универсальных оптимизационных алгоритмов для нахождения оптимальных решений;

3) настраиваемость ГА для нахождения оптимального решения для каждой конкретной задачи. Причем настройка может быть проведена весьма точно, что позволяет найти оптимальное решение за минимальный интервал времени;

4) большая скорость работы настроенного ГА, которая зачастую оказывается максимальной;

5) возможность получения с помощью ГА альтернативных решений для одной задачи, где результат будет одинаков, а значения параметров различные.

Более эффективными могут оказаться лишь оптимизационные алгоритмы с направленным поиском, у которых четко определена цель и путь её достижения с минимальным количеством итераций [70].

Таким образом, ГА являются наиболее оптимальным используемым инструментом нахождения эффективных решений для различных областей исследований, в которых четко задана зависимость целевой функции (ЦФ) от параметров или свойств объекта.

Для определения оптимальных характеристик МГ наиболее подходящими являются ГА, поскольку путь, определяющий оптимальное решение, неизвестен, известно лишь значение целевой функции, которое определяет наиболее эффективную работу МГ. Разрабатываемый алгоритм возможно применять для определения различных оптимальных характеристик МГ, но в каждом конкретном случае будут меняться: структура внутренних данных, блочная структура и настройки алгоритма.

3.4.1. Структура внутренних данных генетических алгоритмов

Для поиска оптимального распределения горизонтальной составляющей поля рассеяния и выходного сигнала асимметричных ТМГ и для определения наибольшей эффективности работы ТМРГ [88,89] используем один и тот же ГА. Выражения, задающие определяемые свойства МГ, являются формулами [88,89], в которых каждый из параметров определен на своем интервале значений, а результатом является выходная характеристика МГ.

Параметры МГ включаются в хромосому в виде генов, каждый из которых изменяется на своем интервале значений. Каждый ген, входящий в хромосому решения, четко сопоставлен со своим интервалом изменения и с шагом изменения, который задается пользователем в начале работы алгоритма.

1. В задаче определения оптимального распределения поля рассеяния асимметричных тонкопленочных МГ генами являются:

g – величина рабочего зазора;

p – длина полюсных наконечников;

Δp – общая длина дополнительных тонкопленочных слоев;

k_1 – коэффициент, зависящий от искривленности силовых линий горизонтальной составляющей поля рассеяния вблизи рабочего зазора и полюсного наконечника;

k_2 – коэффициент, зависящий от величины градиента горизонтальной составляющей поля рассеяния в направлении оси ОУ;

k_3 – коэффициент, зависящий от величины градиента горизонтальной составляющей поля рассеяния вблизи полюсного наконечника с дополнительными слоями;

H_g – напряженность поля рассеяния в центре рабочего зазора ($x = 0, y = 0$).

Следовательно, если использовать приведенный порядок следования генов, хромосома может выглядеть следующим образом (рис. 3.12):

G	p	Δp	k_1	k_2	k_3	H_g
-----	-----	------------	-------	-------	-------	-------

Рис. 3.12. Пример вида хромосомы для разработанного ГА

2. В задаче определения оптимального выходного сигнала асимметричных тонкопленочных МГ генами являются:

v – скорость движения носителя;

M_r – остаточная намагниченность;

w – ширина дорожки;

δ – толщина рабочего слоя магнитного носителя;

d – расстояние “головка – носитель”.

Остальными генами являются параметры, определяющие поле рассеяния.

3. В задаче определения наибольшей эффективности работы ПТМРГ генами являются следующие параметры:

x – расстояние от рабочей поверхности головки до произвольной точки;

L – ширина сердечника;

σ – проводимость материала внутриззорного слоя (интервал изменения данного гена задается из тех соображений, что состав материала внутриззорного слоя меняется в определенных пределах, т. е. для получения лучшего решения можно взять другой материал);

W – ширина МРЭ;

S – расстояние от рабочей поверхности головки до середины МРЭ;

l – глубина рабочего зазора сердечника;

μ_1 и μ_2 – относительная магнитная проницаемость материалов сердечника и МРЭ соответственно;

p – толщина полюсов сердечника;

t – толщина МРЭ;

g_1 – ширина рабочего зазора сердечника;

g_2 – расстояние от МРЭ до противоположащей ветви сердечника.

3.4.2. Структура генетического алгоритма

Для разработки ГА алгоритма определения оптимальных характеристик, обуславливающих эффективность МГ, используем простой генетический алгоритм (ПГА), поскольку все гены, входящие в хромосомы исходных данных, являются независимыми параметрами со своими собственными значениями. Поэтому здесь невозможно применение таких сложных операторов, как делеции, транспозиции, транслокации и др. [87, 90 – 92].

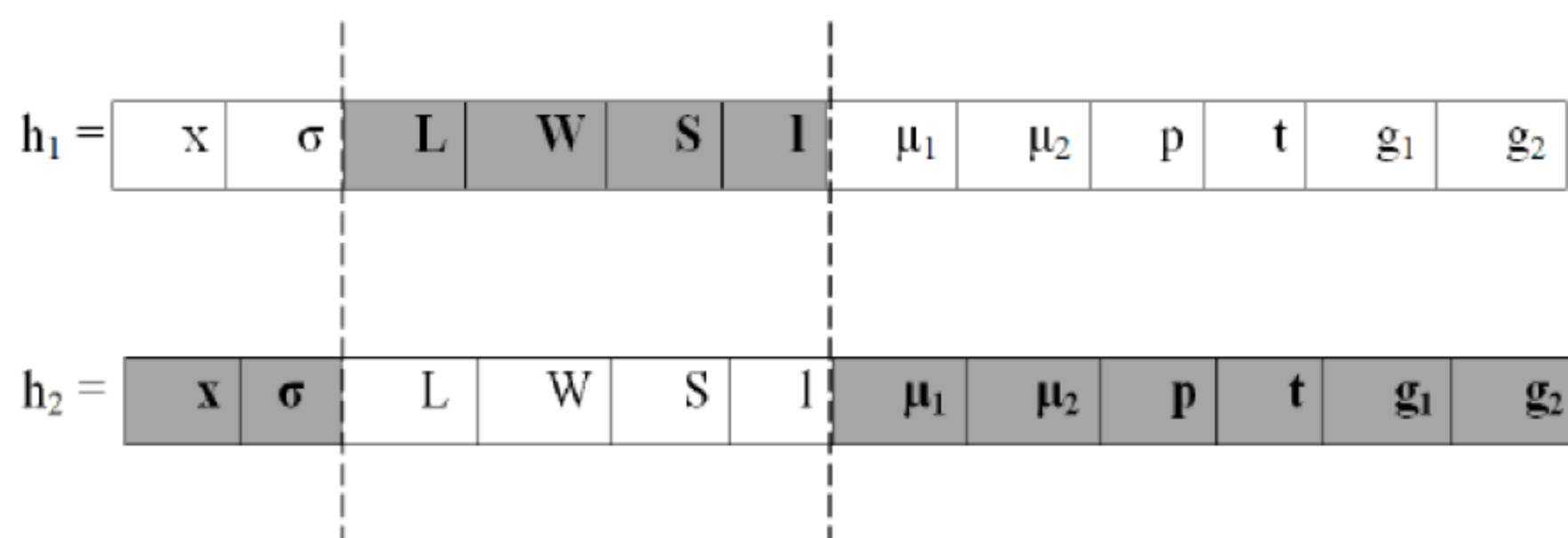
Структура разработанного ГА состоит из операторов: одното-чечного, двухточечного или многоточечного кроссинговера (по выбору пользователя), точковой или случайной мутации, элитной селекции.

В процессе осуществления подробного анализа формул целевых функций можно определить участки хромосомы, которые влияют на ЦФ в той или иной степени. Иначе говоря, перед запуском алгоритма пользователь может назначить вид кроссинговера, который позволит найти необходимое решение более быстро и качественно. Кроссинговер задается вероятностью кроссинговера P_k .

Например, для задачи определения наибольшей эффективности работы ПТМРГ можно определить точки кроссинговера как на рис. 3.13.

Оператор мутации также является настраиваемым. В процессе работы можно определить, какой из генов попадает в локальный ми-

нимум, и соответственно определить для него оператор мутации. Случайная мутация существует для всех генов, когда сгенерированная вероятность попадет в заданный для мутации интервал вероятности.



После кроссинговера:



Рис. 3.13. Пример распределения точек кроссинговера

Таким образом, оператор мутации регулируется вероятностью мутации P_m .

Оператор элитной селекции выбирает из популяции потомков и популяции родителей хромосомы с лучшими ЦФ. При этом введена небольшая эвристическая обработка, которая определяет, не даст ли хромосома после скрещивания худшего решения. Данная эвристическая обработка может быть введена пользователем в начале работы алгоритма и основывается на рассмотрении специализированных участков [93].

Работа алгоритма (структурная схема алгоритма приведена на рис. 3.14) состоит из следующих шагов:

Шаг 1. На начальном этапе работы алгоритма задаются исходные данные: ЦФ, состав переменных, входящих в хромосому, порядок их следования. Переменные, не меняющие своего значения, задаются в виде констант. В качестве исходных данных определяются интервалы изменения каждого гена, шаг изменения значений гена. Обязательно определяются параметры ГА (вероятность кроссинговера P_k , вероятность мутации P_m), определяются точки кроссинговера, настраивается оператор селекции, определяется количество хромосом, которое войдет в новую родительскую популяцию после отбора, задается количество итераций работы алгоритма.

Шаг 2. Запуск алгоритма. Формируется начальная родительская популяция посредством случайного генерирования каждого гена, учитывая интервал и шаг его изменения.

Шаг 3. Применение операторов кроссинговера и мутации в зависимости от сгенерированных вероятностей кроссинговера и мутации. В результате этого появляется дочерняя популяция.

Шаг 4. Применение оператора элитной селекции. Для каждой хромосомы из дочерней популяции просчитываются значения ЦФ. По этим значениям выбирается определенное в начале работы число хромосом, которые заносятся в новую родительскую популяцию.

Шаг 5. Вывод очередных точек максимальной, средней и



Рис. 3.14. Структурная схема разработанного ГА

минимальной ЦФ для всей популяции. Увеличение счетчика итераций. Если количество итераций меньше заданного, то переход на шаг 3. Если все итерации пройдены, то переход на шаг 6.

Шаг 6. Вывод полученного решения в виде схемы МГ и рекомендаций по подбору материалов для компонентов МГ.

Шаг 7. Конец.

3.4.3. Работа программного модуля

Исходные данные и параметры работы алгоритма, а также реализация разработанного алгоритма проводились на примере определения оптимальных значений параметров ПТМРГ из заданного интервала для каждого параметра в отдельности. С этой целью в программную среду, реализующую данный ГА, было занесено начальное значение, интервал исследования параметра и шаг его варьирования. В расчете участвовали 12 параметров, которые являются определяющими для вычисления значения целевой функции, заданной в виде формулы вычисления эффективности ПТМРГ. Таковыми являются следующие параметры: L – ширина сердечника; ω – циклическая частота изменения электромагнитного поля; σ – проводимость материала внутризазорного слоя; W – ширина магниторезистивного элемента (МРЭ); S – расстояние от рабочей поверхности головки до середины МРЭ; l – глубина рабочего зазора сердечника; μ_1 и μ_2 – относительная магнитная проницаемость материалов сердечника и

МРЭ соответственно; p – толщина полюсов сердечника; t – толщина МРЭ;

g_1 – ширина рабочего зазора сердечника; g_2 – расстояние от МРЭ до противоположащей ветви сердечника. Исходные данные для работы алгоритма отображены в табл. 3.5.

Работа программного модуля в целом является настраиваемой.

Количество хромосом в популяции, как и тех, что заносятся в родительскую популяцию после селекции, а также количество итераций определяются пользователем в процессе работы. Отметим, что пользователь устанавливает и значения вероятности кроссинговера P_k , и мутации P_m .

Таблица 3.5

Исходные данные для работы алгоритма

Параметр	Начальное значение	Интервал изменения	Шаг изменения
$L, м$	0,005	0,005	0,001
$W, м$	10e-6	50e-6	1e-6
$S, м$	10e-6	70e-6	1e-6
$l, м$	100e-6	400e-6	10e-6
$p, м$	1e-6	2e-6	0,1e-6
$t, м$	10e-9	80e-9	1e-9
$\omega, Гц$	0,3e+6	0,5e+6	0,01e+6
$\sigma, Ом*м$	0,80e-6	0,20e-6	0,01e-6
μ_1	2000	500	10
μ_2	2000	500	10
$g_1, м$	1e-6	1e-6	0,05e-6
$g_2, м$	1e-6	4e-6	0,1e-6

В процессе эксперимента были установлены следующие начальные параметры ГА:

$P_k = 0,06$ (вероятность кроссинговера);

$P_m = 0,33$ (вероятность мутации);

MaxGen = 2000 (количество итераций алгоритма);

MaxPop = 30 (размер популяции).

Программная система, реализующая разработанный ГА, построена таким образом, что в процессе ее работы допустимо изменение параметров алгоритма. Данная возможность введена для того, чтобы в процессе вычисления можно было перенаправить работу алгоритма. Например, если максимальное или минимальное значение целевой функции длительное время не изменяется, то это значит, что алгоритм исчерпал настройки ГА и попал в локальный оптимум. В подобном случае подвергаются изменению значения вероятностей кроссинговера или мутации, так что алгоритм находит новые оптимальные значения.

Дополнительно в программную среду введены возможности:

- просмотра динамического изменения графика значений целевой функции – минимальное, максимальное и среднее для популяции хромосом;

- графическое отображение родительской и дочерней популяции в виде цветового выделения значений генов хромосомы, что позволяет выявлять моменты, когда алгоритм исчерпывает варианты подстановки генов хромосом, и, как следствие, должен попасть в локальный оптимум;

– при получении необходимого, по мнению пользователя, значения целевой функции можно прервать работу программной системы в любой момент с получением итогового результата.

Кодирование генов хромосом решения

Для кодирования генов хромосом, составляющих решение для определенного частного случая, была использована табл. 3.5. Каждый ген кодировался целым числом, принадлежащим интервалу, который определялся для каждого конкретного параметра делением интервала параметра на шаг параметра. Таким образом, закодированная хромосома, составляющая решение поставленной задачи, может выглядеть следующим образом (рис. 3.15):

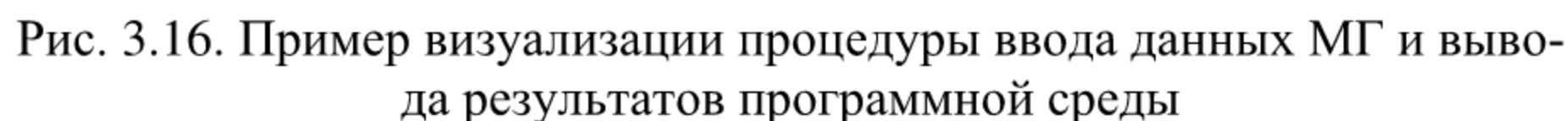
1	5	69	0	6	5	0	0	28	0	12	5
---	---	----	---	---	---	---	---	----	---	----	---

Рис. 3.15. Закодированная хромосома решения

Результат решения задачи

Программная система, реализующая разработанный алгоритм, выглядит следующим образом (рис. 3.16).

В результате проведенных вычислений был получен оптимальный вариант, соответствующий поставленным начальным условиям и удовлетворяющий требованиям задачи поиска параметров ПТМРГ при минимальном значении ее эффективности.



2	49	0	5	10	3	0	18	11	0	0	0
---	----	---	---	----	---	---	----	----	---	---	---

Целевая функция при декодировании хромосомы составила найденное оптимальное значение, равное 0,0092705547310632.

Таблица 3.6

Значения параметров решения

Параметр	Значение параметров решения
$L, м$	0,007
$W, м$	59e-6
$S, м$	10e-6
$l, м$	150e-6
$p, м$	2e-6
$t, м$	13e-9
$\omega, Гц$	0,5e+6
$\sigma, Ом*м$	0,98e-6
μ_1	2110
μ_2	2000
$g_1, м$	1e-6
$g_2, м$	1e-6

Данный алгоритм позволяет найти любые необходимые решения, стремящиеся к определенному значению, определяемому оптимальным значением ЦФ. Необходимо отметить, что алгоритм проводит вычисления за полиномиальное время $\{СВСА \approx O(n) - O(n^2)\}$, что позволяет проводить испытания неограниченное количество экспериментов, добиваясь каждый раз лучшего решения [94].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные в монографии положения посвящены научным исследованиям в области разработки физико-технологических основ создания различных модификаций электронных устройств с высокоплотной записью информации.

Проанализированы основные физико-технологические проблемы, возникающие при разработке различных типов электронных устройств (магнитных головок различных модификаций) с высокоплотной записью информации. Выявлена взаимосвязь параметров магнитных головок с используемыми в их производстве магнитными материалами и неорганическими стекловидными диэлектриками.

Разработана модель расчета температурных полей в спаях стекловидного диэлектрика с металлом, позволяющая дать оценку влияния указанных напряжений, возникающих за счет термостойкости стекловидных покрытий, на технологичность изготовления магнитных головок. Введение оценочного критерия C_i позволяет значительно упростить расчетные формулы для вычисления напряжений, возникающих в покрытии.

Предложены модели структурной и механической релаксации для стекловидных диэлектриков, используемых в производстве магнитных головок, заключающиеся в учете зависимости спектра времени релаксации от структурной температуры, расширяющие их применение в таких средах и условиях, когда не выполняются принципы термореологической простоты. Разработанный подход к расчету изменений свойств стекла в результате структурной и механической ре-

лаксации позволил впервые давать оценку механических напряжений: в несимметричных спаях стекла с упругим материалом, в спаях стекла со стеклом, в плоских спаях стекол с ферритами, в тройных спаях “стекло – пермаллой – феррит” для видеоголовки, в двухслойной структуре для видеоголовки, а также провести динамические исследования макронапряжений пленок пермаллоя, нанесенных на стекло-видную подложку. Сравнение полученных экспериментальных результатов с теоретическими указывает на корректность предложенных моделей.

Показана возможность использования генетических алгоритмов для разработки модулей контроля параметров функционирования электронных устройств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гитлиц М.В. Магнитная запись сигналов. – М.: Радио и связь, 1990. – 225 с.
2. Василевский Ю.А. Носители магнитной записи. – М.: Искусство, 1989. – 286 с.
3. Дэвис Г.Л. Применение точной магнитной записи. – М.: Энергия, 1967. – 286 с.
4. Mine H. e. a. II IEEE Trans. On Magn. 1991. V.27.
5. Карпенков С.Х. Тонкопленочные накопители информации. – М.: Радио и связь, 1993. – 504 с.
6. Карпенков С.Х. Тонкопленочные средства магнитных накопителей // Радиоэлектроника. 1993. №6. С. 72.
7. Карпенков С.Х. Характеристика различных модификаций тонкопленочных магнитных преобразователей // Зарубежная радиоэлектроника. 1992. №1. С. 57 – 72.
8. Карпенков С.Х. Характеристика различных модификаций тонкопленочных магнитных преобразователей // Зарубежная радиоэлектроника. 1992. №3. С. 29 – 42.
9. Lensen R.A. e. a. Magnetic bubbles // IEEE Trans on Magn. 1990. V.26. №5.
10. Tsang Ch. e. a. Magnetic bubbles- an emerging new memory technology // IEEE Trans on Magn. 1990. V. 26. №5.
11. Kehr W. D. e. a. A magnetoresistive readout transducer // IEEE Trans on Magn. 1988. V.24. №6.

12. Пат. №3493694 США, Magnetoresistive head / R. P. Hunt. I Ssued, 03.02.1970.
13. Технология тонких пленок: Справочник / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнсга; Пер. с англ. Т.2. – М.: Сов. радио, 1977. – 768 с.
14. Шух А.М. Исследование процесса воспроизведения цифровой магнитной записи тонкопленочными магниторезистивными головками. Дис. канд. физ.-мат. наук. – Минск, 1983.
15. Богородский Ю.Л., Королев Е.Ф. Современное состояние и перспективы использования магниторезистивных и интегральных головок // Измерения, контроль, автоматизация. 1981. №6 (40). С. 34 – 42.
16. Мазурин О.В. Отжиг спаев стекла с металлом. – Л.: Энергия, 1980. – С. 23 – 27.
17. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. – М.: МГУ, 1975. – 360 с.
18. Крюкова В.С. Магниторезистивная головка: конструктивные и технологические решения. Перспективы использования. Обзоры по электронной технике. – М.: ЦНКИ «Электроника», 1979. – 27 с.
19. Карпенков С.Х. Магниторезистивное воспроизведение информации. – М.: Знание, 1989. – 64 с.
20. Карпенков С.Х. Совершенствование тонкопленочных магниторезистивных головок // Зарубежная электроника. 1980. №2. С. 59 – 81 .

21. Van Lier J. C., Koel C. J. Combined thin film magnitore-sistive read // IEEE Trans Magn. 1976. Vol. Magn. 612. №6. P. 716 – 718.
22. Аппен А.А. Температуроустойчивые неорганические покрытия. – Л.: Химия, 1967. – 240 с.
23. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т.4. – М.: Наука, 1979. – 652 с.
24. Олвер Ф. Введение в асимптотические методы и специальные функции. – М.: Наука, 1978. – 375 с.
25. Малюков С.П. Стекловидные диэлектрики в производстве магнитных головок: Монография. – Таганрог: Из-во ТРТУ, 1998. – 181 с.
26. Журавлев Г.И. Химия и технология термостойких неорганических покрытий. – Л.: Химия, 1975. – С. 10 – 11.
27. Малюков С.П., Бородинский М.П. Автоматизированная система расчета температурных полей в спаях стекловидного диэлектрика с металлом // Программные продукты и системы. 2002. №1. С. 34 – 37.
28. Мазурин О.В. Отжиг спаев стекла с металлом. – Л.: Энергия, 1980. – 140 с.
29. Мазурин О.В. Стеклование. – Л., 1986. – 158 с.
30. Narayanaswamy O.B. Annealing of glass // In: Glass, science and Technology. V.3. N. Y. 1986. P. 275 – 318.
31. Bast De J., Gilard P. Rheologie du verre sous contrainte dans l'intervalle de transformation. // C. R. Rech. Tech. Sci. Ind., Belge du Verre. 1969. V. 36. P. 1 – 192.

32. Гончукова Н.О., Рехсон С.М. Деформация стекла в интервале стеклования // Физика и химия стекла. 1977. Т. 3. №5. С. 501 – 505.
33. Douglas R.W., Isard I.O. Density changes in fused silica // J. Soc. Glass Technol. 1951. V. 35. №165. P. 206 – 225.
34. Crochet M. I., Be Bast J., Gilard P., Tackels G. Experimental study of stress relaxation during annealing // J. Non – Crystalline Solids. 1974. V.14. P. 242 – 254.
35. Старцев Ю.И., Шютт Г.Ю., Вострикова М.С. О связи релаксации электропроводности и вязкости оконного стекла в интервале стеклования // Физика и химия стекла. 1981. Т. 7. №2. С.165 – 169.
36. Рубанов В.Г., Филиппов А.Г. Оптимизация процесса отжига стеклоизделий // Стекло и керамика. 1997. №8. С. 3 – 6.
37. Tauke J., Litovitz T.A., Macedo P.B. Viscous relaxation and non – arrhenius behavior i B₂O₃ // J. Amer. Coram. Sos. 1968. V. 51. №3. P. 158 – 163.
38. Macedo P.B., Simmons T.H., Holier W. Spectrum of relaxation times and fluctuation treory; ultrasonic studies on an alkali – borosilicate melt // Phus. Chem. Glass. 1968. V. 9. №5. P. 156 – 164.
39. Mazurin O.V., Starsev Y.K., Stoljar S.V. Temperature dependences of viscosity of glass – forming substavces at constant fictive temperatures // J. Non. Cryst. Sol. 1982. V. 52. №1. P. 105 – 114.
40. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. – М., 1945. – 424 с.

41. Лазарев А.Н. Колебательные спектры и строение силикатов. – Л., 1968. – 248 с.
42. Мазурин О.В. Влияние вторичной структурной релаксации на температурные зависимости свойств полищелочных стекол // Физика и химия стекла. 1988. Т. 14. №3. С. 472 – 475.
43. Мазурин О.В., Старцев Ю.К., Поцелуева Л.Н. Расчет времени достижения высоковязкой жидкостью состояния неустойчивого равновесия // Физика и химия стекла. 1978. Т. 4. №6. С. 675 – 682.
44. Мазурин О.В., Старцев Ю.К., Поцелуева Л.Н. Исследование температурных зависимостей вязкостей некоторых стекол при постоянной структурной температуре // Физика и химия стекла. 1979. Т. 5. №1. С. 82 – 94.
45. Мазурин О.В., Лебедева Р.Б., Старцев Ю.К. Метод расчета напряжений в спаях стекла со стеклом // Физика и химия стекла. 1980. Т. 6. №2. С. 190 – 194.
46. Мазурин О.В., Старцев Ю.К. Расчет структурной релаксации свойств стеклообразующих веществ при наблюдении признака терморелогической простоты // Физика и химия стекла. 1981. Т. 7. №4. С. 413 – 418.
47. Роус Б. Стекло в электронике. – М.: Сов. радио, 1969. – С. 197 – 230.
48. Гинзбург В.А., Рехсон С.И., Мазурин О.В. Влияние свойств стекла на напряжения спая // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1973. Вып. 10. С. 48 – 54.

49. Мазурин О.В., Стрелицина Н.В. Свойства стекол и стеклообразующих расплавов: Справочник. Т.3. – Л.: Наука, 1977. – 480 с.
50. Малюков С.П., Шапиро Г.Л., Клопченко В.С., Джуплин В.Н. Отчет по научно-исследовательской работе по теме: «Разработка пленочных видеоголовок с комбинированным магнитопроводом». – Таганрог: ТРТИ, 1991, № гос. регист. 01890000418 – 109 с.
51. Василенко А.П., Журавлев Г.И. К расчету термостойкости изделий при крупном разрушении. – Л.: ЛТИ, 1979. – С. 81 – 87.
52. Иванов Р.Д. Магнитные металлические пленки в микроэлектронике. – М.: Сов. радио, 1980. – С. 151 – 168.
53. Василенко А.П., Журавлев Г.И., Лищенко М.Н. К расчету термостойкости изделий при крупном разрушении. – М.: Из-во ЛТИ Моссовета, 1979. – С. 81 – 87.
54. Фридман Р.З., Мазурин О.В. Теория рационального отжига стекла // Физика и химия стекла. 1987. Т. 10. №3. С. 167.
55. Василенко А.М., Конюшков Г.В., Котина Н.М. Разработка методики расчетного и экспериментального определения напряжений в соединениях феррит – металл. – Саратов: Из-во ЦИТИ, 1976. – 21 с.
56. Дудко Г.В., Джуплин В.Н. Влияние отжига в вакууме на внутреннее напряжение в пленках пироплавких металлов // Электронная промышленность. 1973. №4. С. 21 – 29.
57. Малюков С.П., Соколов В.Н., Кекелия З.Г. Автоматизация проектирования видеоголовок с комбинированным магнитопрово-

- дом // Тез. докл. Всероссийская научно-техническая конференция с участием зарубежных представителей. Интеллектуальные САПР. Таганрог, 1992. С.27.
58. Малюков С.П., Халецкий М.Б. Проектирование с помощью ЭВМ видеоголовок // Тез. докл. Всероссийская научно-техническая конференция с участием зарубежных представителей. Интеллектуальные САПР. Таганрог, 1992. С. 28.
59. Малюков С.П., Соколов В.Н. Подсистема оптимизации геометрических параметров видеоголовки с уменьшенной рабочей поверхностью // Тез. докл. Семинар, посвященный памяти В. Г. Королькова: «Проблемы магнитной записи». М., 1993. С. 56.
60. Малюков С.П., Малюкова Е.С. Подсистема оптимизации геометрических параметров магнитных головок // Межведомственный тематический научный сборник «Интеллектуальные САПР». Таганрог, 1995. Вып. 5. С. 159 – 160.
61. Малюков С.П. Автоматизированная система для проектирования магнитных головок // Труды XXVIII интернациональной конференции. «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации, бизнесе. IT+SE' 2001г.». Украина. С. 128 – 130.
62. Малюков С.П., Обжелянский С.А. Проектирование магнитных головок с применением технологии САПР // Известия ТРТУ. 2002. №3. С. 226 – 227.
63. Малюков С.П., Обжелянский С.А. Реализация САПР в технологии магнитной записи // Перспективные информационные тех-

- нологии и интеллектуальные системы (ПИТИС). 2002. №11. С. 61 – 66.
64. Саутин С.Н., Пупин А.Е. Мир компьютеров и химическая технология. – Л.: Химия. 1991. – 142 с.
65. Аппен А.А. Химия стекла. – Л.: Химия, 1970. – 347 с.
66. Малюков С.П., Обжелянский С.А. Математическая модель прессования горячепрессованных ферритов // Известия ТРТУ. 2001. №4. С. 212 – 217.
67. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Гояновский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
68. Нисигава Т. Изготовление ферритов методом горячего прессования // Дэнси дзайрё. 1965. Т. 4. №8. С. 19 – 24.
69. Крюкова В.С., Лукьянова Н.А., Павлов Е.В. Состояние и перспективы развития магнитных головок из металлических сплавов // Обзоры по электронной технике. Сер. 6. Материалы. 1983. Вып. 4(96). С. 36.
70. Летюк Л.М., Журавлев Г.И. Химия и технология ферритов. – Л.: Химия, 1983. – 256 с.
71. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1975. – 192 с.
72. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – Л.: Физматгиз, 1962. – 352 с.

73. Малюков С.П., Обжелянский С.А. Алгоритм формирования математической модели синтеза стекловидных диэлектриков для магнитных головок // Известия ТРТУ. 2001. №4. С. 204 – 209.
74. Норенков И.П., Маничев В.Б. Основы теории и проектирования САПР. – М.: Высшая школа, 1990. – 272 с.
75. Малюков С.П., Соколов Ю.Б. Автоматизированные измерительные комплексы // Тез. докл. Всесоюзный научно-технический семинар «Создание интеллектуальных САПР СБИС и электронных средств». М., 1990. С.80.
76. Малюков С.П., Малюков А.С. Опыт реализации САПР для контроля свойств магнитных сплавов носителей перпендикулярной магнитной записи // Междуведомственный тематический научный сборник «Интеллектуальные САПР». Таганрог. 1994. Вып. 4. С. 143 – 145.
77. Малюков С.П. Автоматизированные измерительные комплексы для контроля свойств магнитных сплавов // Известия ТРТУ. 2000. №2. С. 241 – 244.
78. Цесарский А.А., Маслов А.И. Выбор конструкционных материалов для магнитных головок высокоплотной записи // Техника кино и телевидения. 1991. №11. С. 16 – 20.
79. Котов Е.П., Руденко М.И. Ленты и диски в устройствах магнитной записи. – М.: Радио и связь, 1986. – 222 с.
80. Малюков С.П. Интеллектуальные процедуры моделирования системы «носитель информации – магнитная головка» // Тр.

Международного конгресса «Искусственный интеллект в XXI веке». ICAI. 2001. С. 704 – 708.

81. Malioukov S.P. Intellectual procedures of simulation of the system. «Information medium – magnetic head» // Международный конгресс «Искусственный интеллект в XXI веке». М., 2001. С. 839.
82. Молодцов В.А., Наумченко А.С., Малюков С.П., Чиликина Т.Д. Исследование выходных характеристик полупроводниковых тензопреобразователей на основе структур кремний-стекло // Тез. докл. II научно-техническая конференция «Неорганические стекловидные материалы в микроэлектронике». М., 1979. С. 27.
83. Малюков С.П., Халецкий М.Б. Магнитные головки и ленты для цифровой записи // Тез. докл. Научно-практический семинар «Праздник прогресса и будни практики телерадиовещания». М., 1997. С. 20.
84. Малюков С.П. Динамическое взаимодействие магнитной головки с лентой // Известия ТРТУ. 2002. № 1. С. 219 – 223.
85. Векслер Э.М., Бузовский О.И., Гавриш А.П. Исследование процесса изнашивания магнитных головок во времени // Вопросы радиоэлектроники. 1972. Вып. 9.
86. Вичес А.И., Горон А.И., Смирнов В.А. Моделирование канала магнитной записи на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1984. – 181 с.
87. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы: Учебник для вузов. – Таганрог: Из-во ТРТУ, 1998. – 118 с.

88. Карпенков С.Х. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. – М.: Наука, 1979. – 217 с.
89. Paton A. Эффективность планарной одновитковой тонкопленочной магнитной головки // *Jornal of Applied Physics*. 1971. Vol. 42. №13. P. 5868 – 5870.
90. Kureichik V., Malioukov S. An approach to partitioning based on simulated evolution. *SteP 2000 Millenium of Artificial Intelligence*. Helsinki University of Technology. Finland, 2000. С. 5.
91. Малюков С.П., Обжелянский С.А. Применение генетических алгоритмов при разработке магнитных головок // *Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы (ПИТИС)*. 2002. №10. С. 58 – 64.
92. Малюков С.П., Обжелянский С.А. Проектирование магнитных головок с помощью генетических алгоритмов // *Тр. Международной научно-технической конференции IEEE AIS'02 САД*. 2002. С. 592 – 595.
93. Курейчик В.М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР. – М.: Радио и связь, 1990. – 351 с.
94. Kureichik V.M., Malioukov S.P., Kureichik V.V., Malioukov A.S. Genetic algorithms for applied CAD problems. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 236 p.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ С ВЫСОКОПЛОТНОЙ ЗАПИСЬЮ ИНФОРМАЦИИ.....	1
1.1. Современное состояние элементов магнитной записи и материалов, используемых в их производстве	3
1.2. Тонкопленочные магнитные головки.....	7
1.3. Комбинированные магнитные головки.....	12
1.4. Магниторезистивные го ловки.....	15
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛОСКИХ СПЯХ.....	27
2.1. Метод расчета температурных полей в спаях стекловидного диэлектрика с металлом	28
2.2. Модель релаксации напряжений.....	39
2.2.1. Расчет релаксации напряжения в нестабилизированном стекле при несоблюдении принципа термореологической простоты...	39
2.3. Метод расчета напряжений в несимметричных спаях стекла с упругим материалом.....	52
2.3.1. Расчет напряжений в спаях стекла со стеклом	56
2.4. Исследование напряжений в плоских спаях стекол с ферритами.....	61
2.4.1. Исследование механических напряжений в тройных спаях видеоголовки	77

2.5. Исследование механических напряжений в двухслойной структуре ВГ	84
2.6. Динамические исследования макронапряжений пленок пермаллоя	91
2.6.1. Исследование магнитных напряжений в двухслойной структуре ВГ	92
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ГОЛОВОК.....	99
3.1. Математические модели зависимости свойств материала от его состава для изготовления МГ	103
3.1.1. Математическая модель синтеза стекловидных диэлектриков для спаев стекла с титаном.....	103
3.1.2. Математическая модель синтеза стекловидных диэлектриков при формировании соединения стекла с ферритом.....	105
3.1.3. Математическая модель прессования горячепрессованных ферритов.....	109
3.2. Алгоритм формирования математической модели синтеза стекловидных диэлектриков для спаев стекла с титаном.....	115
3.3. Автоматизированные измерительные комплексы для контроля свойств магнитных сплавов	121
3.3.1. Процедуры моделирования системы «носитель информации – магнитная головка».....	128

3.3.2. Динамическое взаимодействие магнитной головки с лентой	131
3.3.3. Разработка эвристического алгоритма определения оптимального взаимодействия МГ с носителем информации	135
3.4. Применение методов генетического поиска для определения оптимальных характеристик магнитных головок	137
3.4.1. Структура внутренних данных генетических алгоритмов	139
3.4.2. Структура генетического алгоритма	142
3.4.3. Работа программного модуля.....	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	152
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	154

Научное издание

Малюков Сергей Павлович

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ С ВЫСОКОПЛОТНОЙ ЗАПИСЬЮ ИНФОРМАЦИИ

Редактор И. А. Проценко

Корректор И. А. Проценко

Технический редактор Т. С. Кирьякова

Дизайнер обложки А. В. Киреев

Лицензия ЛР № 65-41 от 01.09.1999

Подписано в печать 20.11.2009 г.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,75 Уч.-изд. л. 10,3

Тираж 110 экз. Заказ № 762

Издательство Южного федерального университета.

344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, 160.

Тел.: (863) 264-00-19.

Отпечатано в типографии ЮФУ.

344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1.