



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра технологии машиностроения

Александр Николаевич Смирнов, Николай Викторович Абабков

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ИЗНОСА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Электронное учебное пособие

Кемерово 2015

© КузГТУ, 2015,
© А. Н. Смирнов,
Н. В. Абабков, 2015

[Вперед→](#)

Рецензент(ы) Клепцов А. А.– заведующий кафедрой технологии машиностроения ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»
Князьков В. Л. – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Александр Николаевич Смирнов, Николай Викторович Абабков. Методы и средства контроля износа поверхностей деталей: учебное пособие [Электронный ресурс] для студентов направления подготовки 15.03.01 (150700.62) «Машиностроение», образовательная программа «Реновация оборудования топливно-энергетического комплекса» / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков. – Электрон. дан. – Кемерово: КузГТУ, 2015.

Изложены методы и средства контроля износа поверхностей деталей. Учебное пособие состоит из двух частей. В первой части представлена информация, касающаяся методов получения износостойких покрытий такими методами, как лазерное и плазменное упрочнение, нанесение металлических и гальванических покрытий. Вторая часть учебного пособия посвящена методам контроля качества поверхностных слоев покрытий, полученных различными методами.

Текстовое (символьное) электронное издание

Минимальные системные требования: Частота процессора не менее 1,0 ГГц; ОЗУ 512 Мб; 20 Гб HDD; операционная система WindowsXP; CD-ROM 4-скоростной; ПО для чтения файлов PDF-формата; SVGA-совместимая видеокарта; мышь.

© КузГТУ, 2015,
© А. Н. Смирнов,
Н. В. Абабков, 2015

[Вперед→](#)

Сведения о программном обеспечении, которое использовано для создания электронного издания	MSWord
Сведения о технической подготовке материалов для электронного издания	Редактор Э. М. Савина
Дата подписания к использованию/дата размещения на сайте	13.04.2015
Объем издания в единицах измерения объема носителя, занятого цифровой информацией (байт, Кб, Мб)	4,63 мегабайт
Продолжительность звуковых и видеофрагментов (в минутах)	–
Комплектация издания (количество носителей, наличие сопроводительной документации)	1 CD-диск, без сопроводительной документации
Наименование и контактные данные юридического лица, осуществившего запись на материальный носитель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28 Тел./факс: 8(3842) 58-35-84

[Вперед→](#)

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<u>Предисловие</u>	6
	<u>Часть 1. Качество поверхности и методы упрочнения</u>	7
1.	<u>Качество поверхности</u>	7
	1.1. <u>Макрогеометрия</u>	7
	1.2. <u>Физико-химические свойства поверхности</u>	9
	1.3. <u>Физико-механические свойства</u>	13
	1.4. <u>Контрольные вопросы</u>	16
2.	<u>Остаточные напряжения, методы их снижения</u>	17
	2.1. <u>Классификация остаточных напряжений</u>	18
	2.2. <u>Контрольные вопросы</u>	28
3.	<u>Основные причины повреждения деталей машин</u>	29
	3.1. <u>Трение и изнашивание</u>	29
	3.2. <u>Механизм изнашивания</u>	34
	3.3. <u>Классификация процессов изнашивания</u>	37
	3.4. <u>Контрольные вопросы</u>	46
4.	<u>Влияние качества поверхности на эксплуатационные характеристики деталей</u>	47
	4.1. <u>Влияние физико-механических свойств поверхности</u>	47
	4.2. <u>Контрольные вопросы</u>	58
5.	<u>Гальванические покрытия</u>	59
	5.1. <u>Свойства гальванических покрытий</u>	59
	5.2. <u>Технология нанесения гальванических покрытий</u>	73
	5.3. <u>Нанесение гальванических покрытий</u>	77
	5.4. <u>Оборудование для нанесения гальванических покрытий</u>	79
	5.5. <u>Контроль качества гальванических покрытий</u>	81
	5.6. <u>Контрольные вопросы</u>	84
6.	<u>Упрочнение деталей с применением лазерного излучения</u>	85
	6.1. <u>Общие понятия</u>	85
	6.2. <u>Технологические лазерные установки для упрочнения деталей</u>	89
	6.3. <u>Оптические системы, используемые в технологии лазерной обработки</u>	96

	6.4.	Тепловые процессы в металлах при лазерной обработке	101
	6.5.	Подготовка поверхности деталей перед лазерным упрочнением	103
	6.6.	Термическое упрочнение поверхностей лазерным излучением	107
	6.7.	Примеры практического применения лазерной термической обработки	114
	6.8.	Контрольные вопросы	117
7.	Методы нанесения металлических покрытий		118
	7.1.	Нанесение покрытий с помощью ионного (катодного) распыления	118
	7.2.	Ионное осаждение покрытий	120
	7.3.	Контрольные вопросы	129
8.	Плазменное напыление покрытий		130
	8.1.	Технологические рекомендации по практической реализации процессов напыления плазменных покрытий	130
	8.2.	Технологическое оборудование для плазменного напыления покрытий	138
	8.3.	Новые порошковые материалы для плазменного напыления покрытий и области их применения	147
	8.4.	Технико-экономический анализ применения технологий плазменного напыления в промышленности	152
	8.5.	Перспективные направления развития плазменных методов нанесения защитных покрытий	153
	8.6.	Контрольные вопросы	159
	Часть 2. Методы диагностики поверхностных слоев		160
9.	Существующие методы диагностики поверхностных слоев		160
	9.1.	Вихретоковый метод и приборы диагностики	162
	9.1.1.	Толщиномеры изоляционных покрытий на электропроводящих основаниях	164
	9.1.2.	Толщиномеры электропроводящих ферромагнитных слоев	166
	9.1.3.	Толщиномеры электропроводящих ферромагнитных покрытий на электропроводя-	

		щих неферромагнитных основаниях	171
9.2.		Магнитная толщинометрия	172
9.3.		Средства оптической толщинометрии	181
9.4.		СВЧ-толщинометрия	182
	9.4.1.	Геометрический метод	183
	9.4.2.	Амплитудно-фазовый метод	186
	9.4.3.	Частотно-фазовый метод	193
	9.4.4.	Метод радиоволновой эллипсометрии	197
9.5		Акустические методы и приборы для измерения толщины	198
	9.5.1.	Эхоимпульсные толщиномеры	198
	9.5.2.	Цифровые толщиномеры	202
	9.5.3.	Толщиномеры с ЭМА-преобразователями	206
9.6.		Спектрально-акустический метод. Автоматизированная акустическая система «АСТРОН»	207
9.7.		Контрольные вопросы	215
10.		Перспективы диагностирования поверхностных слоев	216
	10.1.	Диагностика покрытий и слоев с разрешением по глубине. Многослойные покрытия	216
	10.2.	Магнитные меандровые магнетометры, МWM	220
	10.3.	Контроль поверхностных слоев, упрочненных концентрированными источниками теплоты	222
	10.4.	Некоторые подходы к контролю усталости ферромагнитных материалов	224
	10.5.	Новый взгляд на капиллярную дефектоскопию	225
	10.6.	Контроль наноразмерных поверхностных дефектов	227
	10.7.	Контрольные вопросы	229
		Список литературы	230

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основным средством интенсификации производства является научно-технический прогресс, который связан с созданием сложных современных машин и приборов, с постоянным повышением требований к их характеристикам, с необходимостью объединять в единые комплексы самые разнообразные технические устройства.

Одной из основных проблем машиностроения промышленно развитых стран является проблема повышения качества продукции.

Качество машины – емкое понятие. Оно включает такие компоненты, как *коэффициент полезного действия, производительность, точность, металлоемкость, надежность, бесшумность в работе, удобство и легкость управления и обслуживания, эстетичность.*

Качество детали в значительной степени определяется свойствами поверхностного слоя материала, из которого она изготовлена. Это связано с тем, что при любых видах нагружения (кручение, изгиб и др.) наибольшее напряжение испытывают поверхностные слои материала деталей машин, а внутренние практически не испытывают нагрузок. Поверхностные слои также противостоят износу, коррозии, тепловому и другим видам воздействий при эксплуатации. Наряду с традиционными методами обеспечения эксплуатационных характеристик деталей машин (химико-термическая обработка, поверхностная закалка, поверхностное пластическое деформирование и др.) в последние годы нашли применение новые эффективные методы. К ним относятся: лазерная и электронно-лучевая обработка поверхности деталей с целью повышения стойкости против коррозии и изнашивания; высокоэнергетические методы нанесения защитных покрытий (газопламенные и плазменные); ионная имплантация поверхностного слоя; парофазная технология, позволяющая получать слоистые структуры с заданными свойствами и др. Роль технологии в обеспечении качества деталей машин является определяющей.

Предлагаемое учебное пособие предназначено для бакалавров машиностроительных специальностей вузов. Оно может быть использовано при выполнении технологической части курсового и дипломного проектов.

[Вернуться в оглавление](#)

ЧАСТЬ 1. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ

ГЛАВА 1. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ

В технике под поверхностью детали понимают наружный слой, который по строению и другим свойствам отличается от внутренней части. Комплекс свойств, приобретаемых поверхностью детали в результате ее изготовления, характеризуется обобщенным понятием «качество поверхности».

Качество поверхности определяется физико-механическими, физико-химическими свойствами, а также геометрией поверхности. Указанные характеристики качества поверхности влияют на такие служебные свойства деталей, как сопротивление усталости, износо-, коррозионо- и эрозионностойкость, и связаны со свойствами сопряжения.

[Вернуться в оглавление](#)

1.1. Макрогеометрия

Детали на чертежах изображают в виде элементов, ограниченных поверхностями строго определенной геометрической формы, и мысленно такими они представляются. Всякое реальное тело имеет отклонения от идеальной формы, именуемые *погрешностями*.

Погрешности обработанной поверхности детали с точки зрения их образования и методов измерительной техники, применяемых для их определения, можно подразделить на три категории: макрогеометрические отклонения, волнистость поверхности, шероховатость поверхности (микрогеометрические отклонения).

Макрогеометрические отклонения. Под такими отклонениями формы поверхности (или профиля) понимают отклонения формы реальной поверхности (реального профиля) от формы номинальной поверхности (номинального профиля). Например, детали с боковой поверхностью кругового цилиндра могут иметь следующие погрешности: отклонение контура от окружности (овальность, огранка); отклонения от прямолинейности образующих при прямолинейности оси цилиндра (бочкообразность,

корсетность); отклонения от прямолинейности образующих (конусообразность); криволинейности оси. Величина и характер этих отклонений могут быть определены путем измерения диаметра детали в различных поперечных сечениях по длине, а в данном поперечном сечении – в различных направлениях. У плоских поверхностей возможны выпуклость, вогнутость и т.п.

Возникновение макрогеометрических погрешностей поверхности происходит в основном из-за неточностей станка, на котором производится обработка; погрешностей установки заготовки; силовых и температурных деформаций системы станок – заготовка – инструмент и износа инструмента в процессе обработки заготовки.

Волнистость поверхности. Это совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояние между смежными возвышенностями или впадинами превышает базовую длину l . Волнистость занимает промежуточное положение между макрогеометрическими погрешностями (отклонениями формы) и шероховатостью поверхности.

Волнистость поверхности образуется в результате неравномерности подачи при точении и шлифовании, неплоскостности направляющих и вынужденных колебаний системы станок – заготовка – инструмент, возникающих из-за неравномерности сил резания, наличия неуравновешенных масс и т.д. К другим причинам можно отнести копирование волнистости режущего инструмента, искажение формы шлифовального круга и его неравномерный износ, а также погрешности движения инструмента или заготовки. При шлифовании сильно сказывается дисбаланс круга. При зубофрезеровании ошибка червяка делительной передачи станка проявляется в виде волнистости поверхности боковой поверхности зуба. От шероховатости волнистость отличается значительно большим шагом; при чистовой обработке он не менее 0,25 мм, при черновой – превышает 8 мм. Нередко бывает, что высота волны при чистовом точении и цилиндрическом шлифовании доходит до 15 мкм при шаге до 14 мм.

(Подробнее смотри в УП по ППД, метрологии и др.)

[Вернуться в оглавление](#)

1.2. Физико-химические свойства поверхности

Физико-химические свойства поверхности характеризуются наличием на металлической поверхности различных пленок, прочно связанных с основным металлом.

Поверхностный слой металла обладает большой активностью. Это обусловлено тем, что внутри твердого тела каждый атом окружен другими атомами и связан с ними прочно по всем направлениям, а у атомов, расположенных на поверхности, с внешней стороны нет «соседей» в виде таких же атомов. Поэтому в поверхностном слое у атомов твердого тела остаются так называемые свободные связи, наличие которых создает вблизи поверхности атомное (молекулярное) притяжение. В результате этого так называемый граничный слой, включающий в себя примерно два ряда атомов (т.е. толщиной порядка $h = 0,1-1,0$ нм), обладает запасом свободной поверхностной энергии. Поверхностная энергия – это сумма потенциальной и кинетической энергии. Потенциальная энергия связана с искажением нормального построения кристаллической решетки и составляет от долей процента до нескольких процентов нормального интервала между атомами. Кинетическая – вызвана изменением режима колебания атомов в граничном слое.

Адсорбция и хемосорбция. В результате наличия свободной энергии поверхность твердого тела покрывается пленкой веществ, содержащихся в окружающей среде: газов, паров воды, обычно находящихся в воздухе, и паров других жидкостей, а также веществ, растворенных в жидкости и соприкасающихся с поверхностью твердого тела.

Адсорбция – явление образования на поверхности последнего тончайших пленок газа, паров или растворенных веществ либо поглощение этих веществ поверхностью тела.

Наибольшей способностью к адсорбции обладают поверхностно-активные вещества, т. е. вещества, молекулы которых ориентируются при адсорбции перпендикулярно к поверхности (например, органические кислоты, их мыла, спирты, смолы).

Молекулы веществ, адсорбированных на поверхности твердого тела, обладают способностью перемещаться по поверхности из области, где имеется их избыток, в места, где их недостаточно

для полного покрытия поверхности.

Подвижность адсорбированных молекул зависит от вида адсорбции. Адсорбция бывает физической и химической.

При химической адсорбции (*хемосорбции*) адсорбированные молекулы связаны с поверхностью тела, образуют в ней монослой, сходный с химическим соединением. В результате этого подвижность молекул сильно ограничивается.

Хемосорбция в отличие от физической адсорбции носит избирательный характер. Она протекает с большой интенсивностью в местах нарушения регулярности кристаллической решетки (включениями, либо «дырками»). Во многих случаях физическая и химическая адсорбции протекают одновременно, но одна из них является преобладающей.

Адсорбционный эффект понижения прочности (эффект Ребиндера). Поверхностно-активная среда влияет на процессы деформирования и разрушения твердых тел, значительно понижая их сопротивляемость деформированию и разрушению в результате физической (обратимой) адсорбции поверхностно-активных веществ из окружающей среды. Этот эффект был установлен проф. П.А. Ребиндером и назван его именем. Различают внешний и внутренний адсорбционные эффекты.

Внешний адсорбционный эффект происходит в результате адсорбции поверхностно-активных веществ на внешней поверхности деформируемого тела. Это вызывает пластифицирование поверхности и снижение предела текучести. При внешнем адсорбционном эффекте благодаря адсорбированию слоя поверхностно-активных веществ понижается поверхностная энергия твердого тела, что приводит к облегчению выхода дислокации.

Внутренний адсорбционный эффект вызывается адсорбцией поверхностно-активных веществ на внутренней поверхности раздела – зародышевых микротрещин разрушения, возникающих в процессе деформации твердого тела. Этот эффект заключается в адсорбции атомов поверхностно-активных веществ на поверхности микротрещин при деформации разрушения и облегчения их развития. В результате снижается работа образования новой поверхности.

Растягивающие напряжения, остаточные или от внешней нагрузки, раскрывают ультрамикротрещины и способствуют про-

явлению эффекта Ребиндера. Наоборот, при сжимающих напряжениях трещины замыкаются.

В этом случае происходит «самозалечивание» последних и эффект может не проявиться. При упругой, а тем более при пластической деформации, в отдельных местах поверхности возникают трещины (щели) с незагрязненными стенками. Адсорбируясь по этим стенкам, активные молекулы производят расклинивающий эффект и усиливают деформацию (рис. 1.1). В этом случае создаются предпосылки для проявления расклинивающего действия, которое затем интенсифицирует саму деформацию.

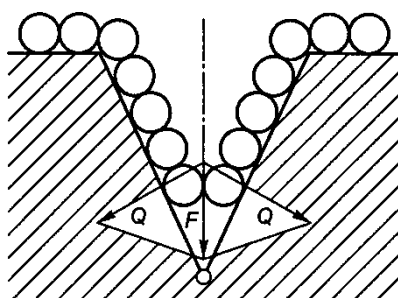


Рис. 1.1. Схема адсорбционно-расклинивающего действия полярных молекул смазочного материала:

F – давление адсорбированного слоя; Q – расклинивающие силы

Внутренний эффект Ребиндера лежит в основе облегчения резания пластичных тел (металлов) под влиянием поверхностно-активных компонентов смазочно-охлаждающих жидкостей.

Пленки на металлических поверхностях. Металлические поверхности в процессе обработки очень быстро покрываются первичной оксидной пленкой. Такие пленки обнаруживаются и на благородных металлах. Несмотря на малую толщину, пленка всего в несколько элементарных ячеек кристаллической решетки данной фазы оксида при нормальной температуре приостанавливает дальнейшее окисление.

Продуктами окисления могут быть твердые растворы кислорода в металле и их химические соединения. Так, железо при нормальной температуре растворяет около 0,05 % кислорода, а при 1000 °С – 0,12 %.

Скорость образования оксидной пленки на поверхности металла исчисляется долями секунды. Например, для возникнове-

ния слоя толщиной 1,4 нм достаточно 0,05 с. С увеличением толщины рост пленки замедляется. Толщина пленки в окисляющихся металлах равна примерно 2–10 нм (10–20 слоев молекул). Например, оксидная пленка стали равна 1–20 нм, алюминия 10–15 нм.

Таким образом, в поверхностном слое (рис. 1.2) можно выделить следующие основные зоны.

Зона 1 – представляет собой граничный слой, состоящий из адсорбированной пленки газов, влаги и смазочно-охлаждающей жидкости, которую можно удалить лишь нагревом детали в вакууме.

Зона 2 – деформированный, сильно раздробленный металл с искаженной решеткой кристаллов и с обезуглерожеными под действием высоких температур при шлифовании участками; в нем находятся оксиды и нитриды, пустоты и надрывы, а также трещины.

Зона 3 – состоит из зерен, сильно деформированных под действием давления шлифовального круга и тангенциальных сил при шлифовании; в ней содержатся структуры свободного цемента, образовавшегося под действием высоких температур.

Зона 4 – металл с исходной структурой.

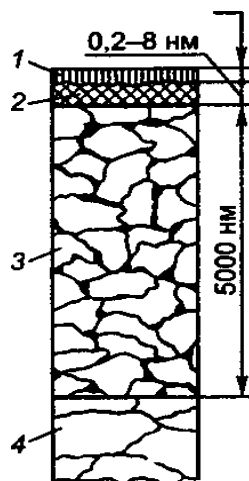


Рис. 1.2. Структура поверхностного слоя шлифованной детали из углеродистой стали

[Вернуться в оглавление](#)

1.3. Физико-механические свойства

Физико-механические свойства поверхностного слоя определяются: твердостью; структурными и фазовыми превращениями; величиной, знаком и глубиной остаточных напряжений; деформацией кристаллической решетки.

Структурные и фазовые превращения. Пластическая деформация, в том числе и при резании металлов, обуславливает изменение микроструктуры. Кристаллические зерна, беспорядочно расположенные в структуре металла, при пластической деформации приобретают однородную ориентацию (текстуру). При обработке металлов, воспринимающих закалку, возможны более глубокие изменения. Фазовые превращения и структурные изменения могут возникнуть в результате высокого поверхностного нагрева и быстрого охлаждения. Например, в процессе шлифования закаленной и отпущенной стали образуется приповерхностный слой аустенитно-мартенситной структуры из вторично закаленного металла. В свою очередь этот слой лежит на слое, имеющем структуру всех стадий отпуска вплоть до структуры исходного термически обработанного металла. При нормальных условиях шлифования слой с измененной структурой обладает почти равной толщиной. Аналогичные превращения можно наблюдать и при точении. В связи с тем что каждой структурной составляющей свойствен присущий ей удельный объем, фазовые и структурные превращения наряду с пластической деформацией являются источниками остаточных напряжений.

Фазовые и структурные превращения при обработке инструментом возможны только для металлов с метастабильной (относительно устойчивой) структурой.

В случае холодной пластической деформации металла его твердость и предел прочности повышаются при одновременном снижении относительного удлинения и относительного поперечного сужения при растяжении. Это явление называют *упрочнением* или *наклепом*.

Деформация кристаллической решетки поверхностного слоя. Несоответствие между реальной и теоретической прочностью кристалла возникает из-за наличия в реальных кристаллах

дефектов. Различают точечные, линейные, поверхностные и трехмерные дефекты кристаллов.

Точечные дефекты – малые несовершенства во всех направлениях – возникают из-за наличия в кристалле атомов примесей (рис. 1.3, *а*) или при образовании вакансий (рис. 1.3, *б*), т.е. пустых мест в узлах кристаллической решетки, не занятых атомами. *Линейными* являются несовершенства малые в двух измерениях и относительно протяженные в третьем. *Поверхностные несовершенства* являются малыми лишь в одном направлении и значительными в двух других (границы зерен, двойники, межфазные границы, поверхность кристалла). *Трехмерные несовершенства* – объемные (пустоты, включения второй фазы и т.д.)

Обычно кристаллы металлов состоят из большого количества областей размером менее 1 мкм, расположенных под углом в десятые доли градуса. Эти области с правильной упаковкой атомов называются *блоками*.

На границе между блоками упаковка атомов искажена (рис. 1.3, *в*).

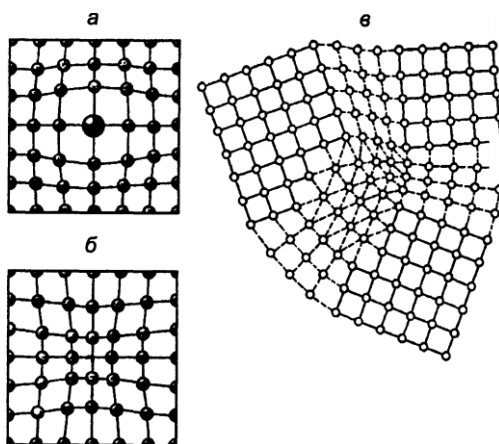


Рис.1.3. Дефекты кристаллической решетки:

Эти несовершенства в большой степени определяют механические свойства кристалла.

При теоретических расчетах прочности кристаллов предполагают, что все атомы расположены в кристаллической решетке в соответствии с кристаллической структурой. Пластическая деформация при таком строении должна быть распределена по всему объему кристалла, так как все его участки одинаковы. В результате можно было бы предполагать наличие одновременного

скольжения параллельных плоскостей (подобно сдвигу в колоде карт). Все атомы участвовали бы в пластической деформации одновременно и оказывали бы большое сопротивление деформации. Однако в реальных кристаллах скольжение происходит по кристаллографическим плоскостям, и пластическая деформация зарождается на небольших участках, постепенно распространяясь по всей плоскости. В каждый момент времени в скольжении участвует небольшое количество атомов кристаллической решетки, в результате эффективность использования сил межатомных связей оказывается очень малой. Сдвиг реального кристалла изображен на рис. 1.4.

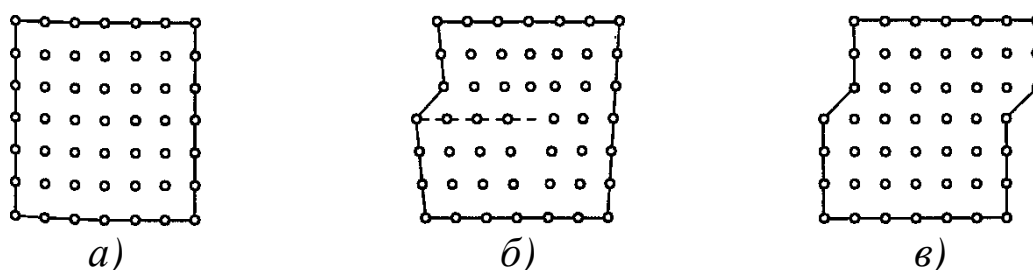


Рис. 1.4. Схема пластической деформации по дислокационному механизму

Перед началом скольжения кристалл имеет правильную форму решетки (см. рис. 1.4, а). Под воздействием напряжения, приложенного к одной из сторон кристалла, образуется сдвиг, при этом в кристалле на границе зоны сдвига возникает линейное разрушение расположения атомов, названное *дислокацией* (см. рис. 1.4, б). Дальнейшее распространение сдвига можно представить как передвижение дислокации через весь кристалл.

В случае выхода дислокации на другую сторону кристалла правильность строения кристаллической решетки восстанавливается, но одна половина кристалла оказывается сдвинутой по отношению к другой на одно межатомное расстояние (см. рис. 1.4, в). Вокруг дислокации создается поле напряжений. При пластической деформации нарушается правильность кристаллической решетки и вследствие этого дальнейшее скольжение затрудняется. Начинается скольжение по другой плоскости и т.д.

Представленная картина относится к скольжению в одном зерне. В реальном металле каждое зерно окружено другими зернами, которые деформируются неоднородно. В пределах каждого

зерна действующие системы скольжения меняются от одного участка к другому. В отдельных случаях линии скольжения распространяются от одного зерна к другому.

Присутствие в кристаллической решетке подвижных дислокаций в большой степени снижает прочность реальных металлов. Поэтому наиболее действенным средством повышения прочности является создание бездислокационных, или бездефектных металлов. Определенные результаты достигнуты в этом направлении. Однако на практике для повышения прочности создают структуры материалов с большим количеством искажений кристаллической решетки, препятствующих движению дислокаций и способствующих увеличению числа мест, где одновременно развивается пластическая деформация. Такое увеличение прочности материала достигается легированием сплавов, химико-термической и механической обработкой.

Кроме механизма сдвиговой деформации известен также диффузионный механизм пластической деформации. В основе последнего лежат атомно-диффузионные перемещения. Интенсивность пластической деформации в этом случае зависит от подвижности диффундирующих атомов и может быть удовлетворительно описана экспоненциальной зависимостью от температуры.

На практике, особенно в условиях трения, оба механизма могут действовать одновременно, оказывая влияние друг на друга.

[Вернуться в оглавление](#)

1.4. Контрольные вопросы

1. Что в технике понимают под поверхностью детали?
2. Чем определяется качество поверхности?
3. Что такое погрешность?
4. Что такое адсорбция и хемосорбция?
5. Какие виды адсорбционных эффектов бывают?
6. Какие основные зоны можно выделить в поверхностном слое?
7. Чем определяются физико-механические свойства поверхностного слоя?

[Вернуться в оглавление](#)

ГЛАВА 2. ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, МЕТОДЫ ИХ СНИЖЕНИЯ

Остаточными называются такие напряжения, которые сохраняются в теле после снятия внешней нагрузки. Основная причина возникновения остаточных напряжений в деталях – неоднородность линейных и объемных изменений их материала. Изменения в материале вызываются технологическими процессами изготовления деталей. К числу этих процессов относятся: литье, обработка давлением, механическая, термическая и химико-термическая обработка и др.

Остаточные напряжения в ряде случаев достигают столь высоких значений, что в результате их образования наблюдаются аварийные разрушения отдельных деталей и даже целых конструкций. В литературе, посвященной остаточным напряжениям, приводятся случаи такого рода аварий.

Балка длиной 12 м самопроизвольно без всякой нагрузки треснула по всей длине на заводе, где была изготовлена. Накануне эта балка подверглась газовой резке по двум косым направлениям. Затем она находилась в цехе в горизонтальном положении. Излом произошел в стенке по всей длине и сопровождался шумом, напоминающим взрыв. Поверхность излома имела грубошероховатый, сильно зазубренный вид. Основной причиной излома, как это было установлено, явились остаточные напряжения, возникшие при прокатке.

Известны случаи разрушения мостов, прошедших испытательную нагрузку и продолжительное время находящихся в эксплуатации. Разрушения вызывались главным образом остаточными напряжениями. *В 1938 г. произошло разрушение моста в г. Рюдерсдорф.* Авария произошла в то время, когда мост находился в ненагруженном состоянии.

В декабре 1942 года в г. Далют, в судне, находившемся на стапелях, т.е. когда не могла иметь место какая-либо нагрузка, произошло образование поперечной трещины длиной в несколько метров в обшивке поперечно-армированного цельносварного танкера. Никакой сварки во время аварии на поврежденных местах обшивки, ни поблизости от них, не проводилось ни во время аварии, ни за несколько дней до нее.

Наблюдались случаи образования трещин значительной длины на едва построенных судах, находящихся еще на стапелях. Во многих подобных случаях основной причиной образования трещин явились остаточные напряжения. Происходили аварии судов и в условиях невысокой нагрузки. Их причиной были также остаточные напряжения, образовавшиеся во время постройки кораблей.

[Вернуться в оглавление](#)

2.1. Классификация остаточных напряжений

Остаточные напряжения классифицируются по признакам протяженности силового поля и по физической сущности.

В зависимости от объема распространения или зоны влияния различают остаточные напряжения трех родов (*по Давиденкову*):

- первого рода, или макронапряжения, уравнивающиеся в объеме всего тела. Эти напряжения возникают главным образом в результате технологических процессов, используемых при изготовлении деталей;
- второго рода, или микронапряжения, уравнивающиеся в объеме зерна (кристаллита) или нескольких блоков (субзерен). Данные напряжения возникают в процессе фазовых превращений и деформации металла, когда разные кристаллиты и блоки внутри них оказываются в различном упруго-напряженном состоянии;
- третьего рода, или субмикронапряжения, локализуемые в объеме кристаллической ячейки. Эти напряжения представляют собой статические искажения решетки, т.е. смещение атомов на доли нанометров из узлов кристаллической решетки.

Все виды напряжений взаимосвязаны между собой, и, например, рост микронапряжений второго рода вызывает образование макронапряжений первого рода.

При оценке влияния остаточных напряжений на эксплуатационные свойства деталей машин учитывается главным образом действие макронапряжений. Влияние субмикронапряжений исследовано недостаточно, так как неизвестен нормальный уровень этих напряжений и его измерение в связи с технологическими факторами. Само распределение субмикронапряжений подчиня-

ется статистическим закономерностям.

При изучении процессов образования остаточных напряжений специалисту с практической точки зрения целесообразнее пользоваться классификацией остаточных напряжений по физической сущности или по причинам, вызывающим эти напряжения.

В зависимости от причин появления остаточные напряжения подразделяются на:

- силовые – напряжения, возникающие в результате воздействия на деталь внешней силы, например при механической обработке;
- тепловые – напряжения, которые образуются в результате разности температур по сечению детали, например при литье, обработке давлением, термической обработке и т.п.;
- структурные – напряжения, возникающие в результате изменения структуры материала детали, например при закалке;
- диффузионные – напряжения, образующиеся в условиях изменения удельных объемов смежных зон металла, вследствие их диффузионного насыщения, например при химико-термической обработке.

Остаточные напряжения качественно подразделяются на растягивающие – и + сжимающие.

В некоторых случаях внутренние остаточные напряжения создаются преднамеренно для улучшения качественных характеристик изделия (поверхностный наклеп, закалка, химико-термическая обработка), а при литье, сварке, механической обработке возникающие остаточные напряжения, наоборот, снижают стабильность изделия, вследствие чего снижается качество продукции. В общем случае наличие остаточных напряжений в материале нежелательно. Это связано с тем, что при их суммировании с напряжениями, возникающими от внешней нагрузки при эксплуатации изделия, возможно преждевременное разрушение.

Возникновение и перераспределение остаточных напряжений всегда связано с деформацией детали или конструкции, которая в общем случае определяется изменением взаимного расположения материальных точек внутри или на поверхности изделия.

Ниже рассмотрены различные технологические процессы, при проведении которых возникают остаточные напряжения, а также технологические методы снижения последних.

Литье. На величину и характер распределения остаточных напряжений в литье влияют: неравномерное охлаждение отливок; сопротивление формы усадке металла; разница в коэффициентах температурного расширения разных частей отливки. Равномерность охлаждения в форме зависит от конфигурации заготовки и состава металла. Основное значение имеет не абсолютная величина температур в различных точках, а характер их изменения по сечению.

Кроме того, при литье заготовок сложной формы на образование временных напряжений влияет сопротивление деформации литейной формы и стержней, находящихся во внутренних полостях, так как разные участки отливки имеют разные пластические свойства и возникают силы сопротивления стержней усадке металла, создающие неравномерное напряженное состояние.

Самым ответственным моментом в литейном производстве является охлаждение отливок в форме: в случае неравномерного распределения температуры по сечению отливок возникают остаточные напряжения.

Напряжения в основном зависят от скорости охлаждения и температуры, с которой начинается охлаждение, а именно: резкое увеличение напряжений происходит при $t > 500$ °С. Повышение скорости охлаждения способствует увеличению внутренних напряжений. Так, например, при максимальной скорости охлаждения в воде возникают напряжения в десятки раз большие, чем напряжения при охлаждении на воздухе, а при охлаждении в печи напряжения практически равны нулю. Неправильный выбор режима охлаждения на воздухе может вызвать коробление заготовки, появление «горячих» или «холодных» трещин. Охлаждение при температурах ниже 400 °С придает металлу высокие пластичность и прочность.

Наибольшее влияние на образование остаточных напряжений скорость охлаждения оказывает при переходе металла из пластического в упругое состояние (для чугуна температурный диапазон 400–700 °С), а при температурах ниже и выше этого интервала она мало сказывается. На практике охлаждение металла происходит медленно и напряжения, вызванные структурной неоднородностью, мало влияют на общий уровень напряжений и обычно снимаются за счет релаксации.

Литейные остаточные напряжения снижаются улучшением технологичности конструкции отливки (создание плавного перехода сечений), естественным, термическим, деформационным и вибрационным старением.

В результате механической обработки литой заготовки равновесие остаточных напряжений нарушается, и заготовка начинает деформироваться. Процесс деформации происходит постепенно. Если чистовые операции механической обработки выполняются сразу же после черновых, то с течением времени готовая деталь теряет требуемую точность.

Традиционными, оправдавшими себя на практике способами термостабилизации являются *естественное старение при переменной температуре, отжиг, отпуск и обработка холодом*. Эти способы получили широкое распространение ввиду их доступности и сравнительной простоты выполнения.

Преимущество *естественного старения* по сравнению с термическим заключается в том, что при этом методе уменьшения остаточных напряжений не ухудшаются механические свойства материала, как, например, при отжиге. Релаксационные процессы интенсивно протекают только в местах концентрации остаточных напряжений. Это повышает сопротивление материала пластическим деформациям и не только стабилизирует размеры заготовок, но и значительно уменьшает опасность возникновения их коробления от действия нагрузок при обработке и транспортировке.

При естественном старении заготовки остаются чистыми, без окалины. Трехмесячное естественное старение равноценно низкотемпературному отжигу при температуре 350–380 °С.

Широкое распространение в промышленности для снятия остаточных напряжений нашел низкотемпературный отжиг (температура отжига 200–700 °С).

При *деформационном старении* к отливке подводится механическая энергия, способствующая стабилизации формы изделия. Деформация заготовок при этом виде старения достигается с помощью статических или циклических нагрузок. При статическом нагружении напряжения, возникающие в заготовке, вызывают пластическую деформацию. В результате возникновения последней уменьшаются исходные напряжения.

При *вибрационном старении* за короткие промежутки времени создается множество циклов нагружения на заданных и контролируемых мощностях и частотах, что обеспечивает завершение стабилизации в течение нескольких секунд.

Вибрационное старение является высокопроизводительным методом снижения остаточных напряжений. Данный метод пригоден для литых, кованных (штампованных), сварных и горячекатаных заготовок; черных и цветных металлов. При этом параметры точности, прочности, твердости и долговечности не снижаются. Кроме того, метод применим к конструкциям любых размеров и массы, а оборудование, необходимое для его осуществления, просто и малогабаритно. Это позволяет использовать его в непрерывном технологическом процессе и в промежуточных – между отдельными операциями механической обработки.

Обработка давлением. Процессы, происходящие в металле при обработке давлением (ковка, штамповка, прокатка, волочение), основаны на неоднородной пластической деформации в сечении металла. Под действием деформирующей силы верхние слои металла стремятся сохранить увеличенные размеры, чему препятствуют недеформированные внутренние слои. Так как поверхностный слой всегда намного меньше внутреннего, напряжения в поверхностном слое значительно выше.

Обработка давлением возможна при нормальной и повышенной температуре, а остаточные напряжения зависят от степени обжата и глубины деформации. В случае обработки при высокой температуре добавляются остаточные напряжения, возникающие от неравномерного охлаждения. Влияние этого фактора на образование остаточных напряжений особенно опасно для маложестких заготовок, например для длинных валов, коленчатых валов и т.п.

Так же, как и для литья, остаточные напряжения в этом случае могут быть уменьшены за счет повышения технологичности конструкции заготовок. Из технологических методов для уменьшения остаточных напряжений, возникающих при указанной обработке, используется отжиг и нормализация, вибростарение.

Сварка. Характерными особенностями сварки являются ее локальный характер, высокие скорости нагрева до температур, превышающих температуры плавления металла (3000 °С при га-

зовой и 4000 °С при электродуговой сварке), что вызывает температурные напряжения, неоднородные структурные преобразования в зонах термического влияния, изменение растворимости газов, окружающих сварной шов.

В наплавленном слое и близлежащих участках при охлаждении возникают остаточные напряжения, так как уменьшение объема затрудняется более холодным окружающим металлом. Величина остаточных напряжений при сварке в сварном шве иногда достигает предела текучести. Обычно наибольшее растягивающее напряжение направлено вдоль шва и в этом направлении происходит ограничение деформации. Сварочные остаточные напряжения возникают во всей свариваемой конструкции, и распределение их по сечению в большой степени зависит от конструкции свариваемого сечения.

Остаточные напряжения при сварке вызывают остаточные деформации свариваемой конструкции, достигающие величин, превышающих допуск на их изготовление.

Сварочные остаточные напряжения эффективно снижаются высокотемпературным отпуском.

Закалка. Внутренние напряжения при закалке стали возникают под влиянием двух факторов: температурного (неравномерность нагрева и охлаждения) и структурного (или фазового) – увеличение объема и неоднородности протекания мартенситного превращения.

При объемной закалке неодинаковое распределение температур по сечению детали при быстром охлаждении сопровождается неравномерным изменением объема. Поверхностные слои сжимаются быстрее, чем внутренние. Сжатию поверхностных слоев препятствуют внутренние слои. В связи с этим в поверхностных слоях образуются временные растягивающие, а во внутренних – сжимающие напряжения.

После охлаждения поверхности и изменения объема поверхностных слоев сердцевина еще будет испытывать *тепловое сжатие*. Вследствие этого напряжения начнут уменьшаться, и в какой-то момент произойдет изменение знака напряжений на поверхности и в сердцевине. После окончательного охлаждения на поверхности возникают остаточные напряжения сжатия, а в сердцевине – растяжения (рис. 2.1, а). Появление остаточных

напряжений является результатом того, что временные напряжения вызывают не только упругую, но и неодновременную и неодинаковую пластическую деформацию слоев по сечению детали.

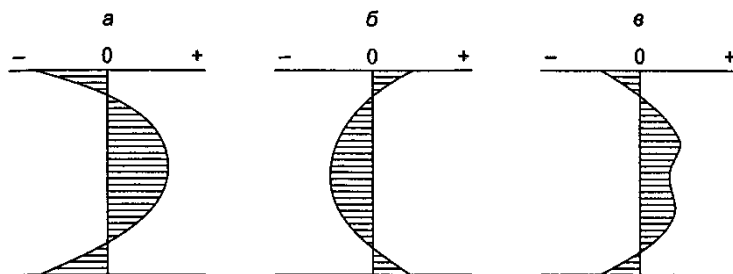


Рис. 2.1. Образование остаточных напряжений при объемной закалке:

a – влияние температурного фактора; *б* – влияние структурного фактора; *в* – суммарные остаточные напряжения

Механизм образования *структурных напряжений* имеет противоположный характер. По достижению при закалке температур ниже точки мартенситного превращения мартенсит в первую очередь образуется на поверхности, где эта точка была достигнута раньше, чем в сердцевине. Превращение аустенита в мартенсит сопровождается увеличением объема. Поэтому на поверхности возникнут временные сжимающие напряжения, а во внутренних слоях – растягивающие. По мере развития превращения знак напряжений на поверхности и в сердцевине меняется. Таким образом, структурные напряжения относительно температурных изменяются в обратном порядке. В результате мартенситного превращения на поверхности образуются остаточные напряжения растяжения, а в сердцевине – сжатия (рис. 2.1, *б*).

Структурные остаточные напряжения так же, как и температурные, возникают в результате появления под действием временных напряжений не только упругой, но и неодинаковой по сечению остаточной пластической деформации.

Температурные и структурные напряжения, возникающие при закалке, суммируются (рис. 2.1, *в*). В данной схеме тепловые напряжения превышают структурные, поэтому на поверхности образовались остаточные сжимающие напряжения. В общем случае в зависимости от соотношения между температурными и структурными напряжениями могут получаться различные эпю-

ры суммарных напряжений, а в поверхностных слоях напряжения могут иметь разный знак и различную величину. Во многих случаях величина структурных напряжений больше, чем температурных.

Если величина напряжений превышает сопротивление отрыву и металл малопластичен, то напряжения не могут быть уменьшены пластической деформацией, что вызывает образование трещин. Наиболее опасны при этом *растягивающие напряжения на поверхности*, которые способствуют образованию трещин и снижают предел выносливости.

При поверхностной закалке нагреву подвергается только поверхностный слой материала детали. Это приводит к возникновению в нем временных сжимающих напряжений, под влиянием которых происходит пластическое сжатие сердцевины. При охлаждении нагретый поверхностный слой стремится сократиться в объеме, но встречает сопротивление холодной сердцевины. В результате на поверхности возникают растягивающие остаточные напряжения (рис. 2.2, а).

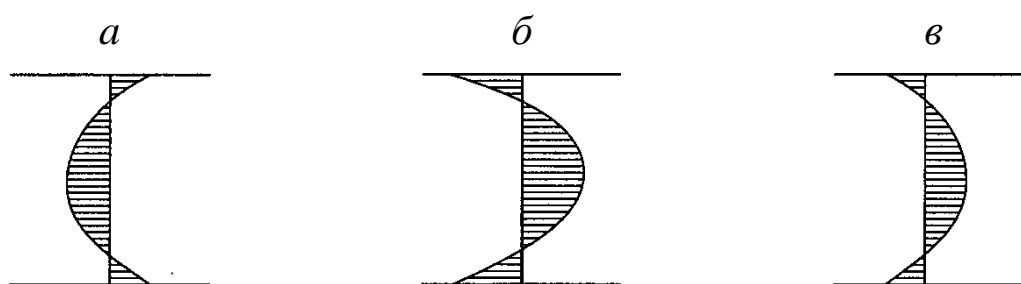


Рис. 2.2. Образование остаточных напряжений при поверхностной закалке:

а – влияние температурного фактора; б – влияние структурного фактора; в – суммарные остаточные напряжения

Система напряжений при поверхностной закалке имеет вид, изображенный на рис. 2.2, в.

Снижения остаточных напряжений после закалки можно достичь в результате отпуска.

Часть верхнего слоя, нагретая выше критической точки, при охлаждении испытывает мартенситное превращение. Этот процесс сопровождается увеличением объема. В результате на поверхности возникают структурные напряжения сжатия. На некоторой глубине напряжения сжатия переходят в напряжения

растяжения, которые имеются в переходной зоне и далее снова меняют свой знак (рис. 2.2, б).

Химико-термическая обработка. Причиной образования остаточных напряжений при химико-термической обработке является разница удельных объемов насыщенных поверхностных слоев и ненасыщенной сердцевины. В результате диффузии насыщающего элемента при химико-термической обработке удельный объем поверхностного слоя возрастает. Сердцевина при этом остается в исходном состоянии. Разность в удельных объемах при химико-термической обработке приводит к образованию остаточных напряжений сжатия.

Уменьшение остаточных напряжений, возникших в данном случае, достигается в результате низкого отпуска.

Механическая обработка. Механизм образования остаточных напряжений при механической обработке заключается в следующем. При резании возле вершины резца в результате силового воздействия возникает пластическая деформация растяжения. После прекращения силового воздействия в поверхностном слое под влиянием силового фактора возникают остаточные напряжения сжатия.

Выделение тепла в процессе резания вследствие деформации и трения приводит к большим температурным градиентам. Это способствует образованию остаточных растягивающих напряжений. Кроме указанных, возможно появление структурных напряжений. Характер и величина суммарных остаточных напряжений после обработки резанием зависят от преобладающего влияния силового или температурного факторов.

Изменение величины и знака остаточных напряжений в результате обработки резанием зависят от: параметров режима резания (скорость резания и подача); геометрии режущего инструмента (величина переднего угла и радиус вершины резца); физико-механических свойств обрабатываемого материала (твердость и пластичность); условий охлаждения.

Наибольшее влияние на величину и знак остаточных напряжений оказывают скорость резания и величина переднего угла.

Повышение скорости резания, сопровождаемое повышением температуры поверхностного слоя, приводит к уменьшению величины и глубины распространения сжимающих напряжений

Изменения переднего угла от положительных к от-

рицательным значениям способствует снижению деформации в зоне стружкообразования. Это сопровождается непрерывным повышением величины и глубины распространения остаточных напряжений сжатия

Увеличение радиуса вершины резца и толщины среза приводит к аналогичным результатам, получаемым обработкой резцами с большим отрицательным углом.

В процессе абразивной обработки на величину и знак остаточных напряжений решающее влияние оказывает температурный фактор. Силовая пластическая деформация влияет в меньшей степени.

При шлифовании в поверхностном слое возникают временные сжимающие температурные напряжения, которые превышают предел текучести материала и вызывают деформацию сжатия поверхностного слоя.

После окончания процесса шлифования и установления нормальной температуры указанная деформация сохраняется. Это приводит к растяжению поверхностных слоев со стороны внутренних и образованию растягивающих остаточных напряжений.

При других видах абразивной обработки (хонингование, полирование, ленточное шлифование, суперфиниширование) преобладающее влияние на образование остаточных напряжений оказывает фактор пластической деформации. В результате в поверхностном слое после обработки указанными методами образуются остаточные напряжения сжатия.

Поверхностное пластическое деформирование (ППД). При обработке ППД (обкатка роликами и шариками, раскатка, алмазное выглаживание, дорнирование, дробеструйная обработка и др.) остаточные напряжения возникают в результате холодного пластического деформирования тонкого поверхностного слоя материала деталей. В этом случае в поверхностном слое уменьшается удельный объем. Нижележащие слои не претерпевают изменений. В этом случае удельный объем материала поверхностного слоя увеличивается. Увеличению удельного объема деформируемого слоя будут препятствовать лежащие ниже недеформируемые слои, а это приведет к образованию в поверхностных слоях *остаточных напряжений сжатия*.

Газотермические методы нанесения защитных покрытий. При

использовании данных методов могут возникать как сжимающие, так и растягивающие остаточные напряжения. Величина и знак остаточных напряжений зависят от метода нанесения покрытия, а также химического состава наносимого материала.

Если нанесение покрытия производится в условиях без нагрева или с незначительным нагревом основного объема материала обрабатываемой детали, то величина и знак остаточных напряжений зависят только от химического состава и скорости охлаждения. В случае если химический состав наносимого покрытия аналогичен составу сталей, закаливающихся на воздухе, нанесенное покрытие закаливается с изменением объема в результате структурного превращения. Это приводит к возникновению в поверхностном слое *остаточных напряжений сжатия*.

В случае нанесения покрытия углеродистыми сталями в поверхностном слое в результате температурного фактора возникнут *остаточные растягивающие напряжения*.

При нанесении покрытия со сквозным нагревом всей детали величина и знак остаточных напряжений зависят от температурного коэффициента линейного расширения материала детали и напыляемого покрытия. Если коэффициент линейного материала детали больше, чем напыляемого слоя, то в напыляемом слое возникнут *остаточные напряжения сжатия*, и если меньше – *остаточные напряжения растяжения*.

[Вернуться в оглавление](#)

2.2. Контрольные вопросы

1. Какие напряжения называются остаточными?
2. По каким признакам классифицируются остаточные напряжения?
3. В зависимости от объема распространения или зоны влияния какие различают остаточные напряжения?
4. В зависимости от причин появления остаточные напряжения подразделяются на какие виды?
5. В чем заключается преимущество естественного старения по сравнению с термическим?
6. Какие бывают методы снижения остаточных напряжений?

[Вернуться в оглавление](#)

ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Одной из основных причин выхода из строя деталей машин является износ. На процессы трения и изнашивания существенное влияние, как уже было указано выше, оказывает качество поверхности деталей.

[Вернуться в оглавление](#)

3.1. Трение и изнашивание

Основные термины. *Триботехника* – наука о контактном взаимодействии твердых тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, изнашивания и смазки машин. В триботехнике получили развитие отделы *трибохимия, трибофизика и трибомеханика*.

Некоторые термины, относящиеся к триботехнике, стандартизованы. ГОСТ 23.002-78 включает 97 терминов, которые расквалифицированы по трем видам трения, изнашивания, смазки, методам смазывания и смазочным материалам. К общим понятиям триботехники относятся следующие термины.

Внешнее трение – явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя твердыми телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии.

Трение покоя – трение двух тел при микроперемещениях до перехода к относительному движению.

Трение движения – трение двух тел, находящихся в относительном движении.

Трение скольжения – трение движения двух твердых тел, при котором скорости тел в точках касания различны по величине и по направлению, или по величине или направлению.

Трение качения – трение движения двух твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине и направлению.

Сила трения – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, направленной по касательной к общей границе

между этими телами.

Поверхность трения – поверхность тела, участвующая в трении.

Коэффициент трения – отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу.

Изнашивание – процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющейся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Износ – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. Величина износа может выражаться в единицах длины, объема, массы и др.

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

Скорость изнашивания $u = du/dt$ (мкм/ч) – отношение величины износа ко времени, в течение которого износ возник.

Интенсивность изнашивания $J = du/ds$ – отношение величины износа к относительному пути трения (a), на котором происходило изнашивание. Эта величина будет безразмерной, если износ и путь трения измеряются в одних единицах.

Смазка – действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшается сила трения и (или) интенсивность изнашивания.

Трение имеет молекулярно-механическую природу. На площадках фактического контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения, которые проявляются на расстояниях, в десятки раз превышающих межатомное расстояние в кристаллических решетках, и увеличиваются с повышением температуры. Молекулярные силы при наличии либо отсутствии промежуточной вязкой прослойки (влаги, загрязнения, смазочного материала и т.п.) вызывают на том или ином числе участков адгезию.

Адгезия – слипание разнородных твердых или жидких тел (фаз), соприкасающихся своими поверхностями. Явление адгезии может быть обусловлено одновременно и действием электрических сил.

Более сильным проявлением молекулярных сил является схватывание поверхностей. Сила трения в этом случае зависит от протяженности зон схватывания и сопротивления их разобщенности.

Сила трения T обусловлена механическим и молекулярным взаимодействиями:

Коэффициент трения f представляет собой отношение силы трения к внешней силе.

Трение без смазочного материала реализуется в том случае, когда сопрягаемые поверхности покрыты только оксидными пленками или адсорбированными пленками воды и газа. Имеет место в тормозах, фрикционных передачах и узлах трения, где недопустимо применение смазочных материалов (машины текстильной, пищевой, химической промышленности), либо их применение невозможно вследствие высокой температуры в зоне контакта. Обычно для узлов трения, работающих без смазочных материалов, одно из тел трения изготавливают из композита, содержащего твердое смазывающее вещество (дисульфид молибдена, диселенид вольфрама, графит) или пластические металлы. Твердые смазочные материалы, обладая слоистой структурой и низким сопротивлением сдвигу, снижают силу трения и интенсивность изнашивания трущихся тел.

Трение при граничной смазке. В этом случае поверхности сопряженных тел разделены слоем смазочного материала весьма малой толщины (от толщины одной молекулы до 0,1 мкм). Наличие граничного слоя или граничной пленки снижает силы трения по сравнению с трением без смазочного материала в 2-10 раз и уменьшает износ сопряженных поверхностей в сотни раз.

Молекулы смазочного материала ориентируются перпендикулярно твердой поверхности, что позволяет представить граничную смазку в виде ворса.

Невозобновляемая граничная пленка по мере возрастания пути трения изнашивается, масло пленки адсорбируется на продукты износа и уносится с поверхности трения.

Добавление в граничные слои смазочного материала и водных растворов поверхностно-активных веществ повышает толщину граничного слоя и способствует уменьшению износа (до двух раз).

При граничной смазке на трение и износ оказывают влияние, как характеристики сопряженных материалов, так и свойства смазочного материала. Износ может происходить при локальных разрывах масляной пленки и при передаче усилий через эту пленку, которая играет роль эластичной прокладки и обладает некоторыми свойствами квазитвердого тела.

Жидкостное трение. Этот вид трения характеризуется тем, что трущиеся поверхности разделены слоем смазки жидкого смазочного материала (масла), находящегося под давлением. Давление смазочного материала уравнивает внешнюю нагрузку. Слой смазочного материала – несущий слой. При жидкостной смазке сопротивление движению определяется внутренним трением (вязкостью) жидкости и складывается из сопротивления скольжению масла по толщине смазочной прослойки. Этот режим трения со свойственными ему весьма малыми коэффициентами трения является оптимальным для узла трения с точки зрения потерь энергии, долговечности и износостойкости. Силы трения при жидкостной смазке не зависят от природы сопрягаемых поверхностей.

Для осуществления жидкостной смазки необходимо, чтобы наименьшая толщина смазочного слоя при гладких поверхностях и прочих идеальных условиях была не меньше толщины, при которой проявляются объемные свойства жидкости. Для шероховатых поверхностей наименьшая толщина слоя – минимальное расстояние между вершинами выступов неровностей сопрягающихся поверхностей.

Однако жидкостное трение обладает рядом недостатков. *Во-первых*, оно связано с существенным усложнением конструкции системы смазки. *Во-вторых*, наличие масляного слоя между поверхностями, величина которого зависит от нагрузки, может нарушить точность перемещения узла.

В последние годы появились высокооборотные узлы (шпиндели внутришлифовальных станков, малогабаритные турбины) на аэродинамических опорах, а также поступательные пары на воздушной (аэростатической) подушке, где поверхности разделяет слой воздуха, который служит смазкой. При надежном разделении поверхностей смазкой износ практически исключается, он возможен только лишь в результате физико-химического дей-

ствия жидкой среды или газа, в периоды нарушения жидкостного трения или попадания в смазочный материал абразивных частиц или за счет процесса кавитации.

Влияние вида трения на условия взаимодействия микровыступов сопряженных поверхностей схематично показано на рис. 3.3. При жидкостном трении каждый участок поверхности нагружен постоянным давлением, не изменяющимся при относительном перемещении поверхностей, т. е. статической нагрузкой. Эта нагрузка не в состоянии разрушить микровыступы, так как возникающие напряжения находятся в области больших запасов прочности.

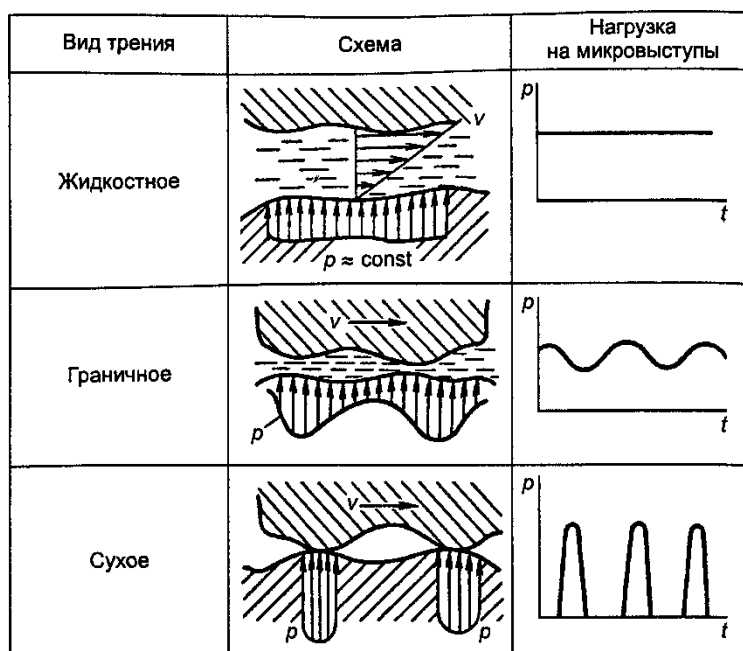


Рис. 3.1. Зависимость нагрузки на микровыступы поверхностей от вида трения

При граничном трении, хоть и происходит перераспределение внешней нагрузки, имеются более нагруженные зоны в месте сближения микровыступов. Поэтому при относительном движении тел возникает колебание напряжений в каждом выступе и создаются условия для их усталостного разрушения. Кроме того, слой смазочного материала предотвращает молекулярное взаимодействие. При сухом трении имеет место непосредственный контакт микровыступов, и нагрузка концентрируется в отдельных зонах. При относительном перемещении напряжение в микровыступах может падать до нуля и коэффициент асимметрии цикла

равен нулю или имеет малую величину. Здесь создаются условия для усталостного разрушения или пластической деформации микровыступов, что приводит к усталостному или абразивному, а при наличии оксидных пленок – к окислительному изнашиванию.

Полужидкостное трение. Имеет место при наличии одновременно жидкостной и граничной смазки.

[Вернуться в оглавление](#)

3.2. Механизм изнашивания

Процесс изнашивания может быть разделен на три явления: взаимодействие поверхностей трения; изменения, происходящие в поверхностном слое металла; разрушение поверхностей. Эти явления не последовательны – они непрерывно переплетаются, взаимно влияя друг на друга.

Взаимодействие поверхностей может быть механическим и молекулярным. Механическое взаимодействие выражается во взаимном внедрении, зацеплении неровностей поверхностей в совокупности с их соударением в случае скольжения грубых поверхностей.

Молекулярное взаимодействие проявляется в виде адгезии и схватывания. Схватывание свойственно только металлическим поверхностям и отличается от адгезии более прочными связями. Молекулярное взаимодействие возможно также на участках взаимного внедрения поверхностей. Оно обязательно будет при разрушении масляной пленки.

Изменения на поверхности трения вызваны деформациями, повышением температуры и химическим действием окружающей среды.

Изменения, вызванные деформацией. Многократные упругие деформации из-за несовершенства структуры материала приводят в определенных условиях к усталостному выкрашиванию поверхностей качения, а многократные упругие деформации микронеровностей поверхностей скольжения разрыхляют структуру.

Пластическое деформирование изменяет структуру материала поверхностного слоя. Разрушение структуры – это заключительный этап пластической деформации по мере увеличения силового воздействия при однократном нагружении. Смещение

кристаллических зерен сопровождается частичным нарушением сцепления, в результате при возрастании напряжения или многократном его повторении происходит ослабление, разрыхление, а в дальнейшем и разрыв структуры.

Пластическая деформация при температуре ниже температуры рекристаллизации способствует наклепу поверхностного слоя – его упрочнению. Однако у самой поверхности структура несколько ослаблена, микротвердость понижена. Последняя, достигает максимума на некоторой глубине, далее уменьшается до исходной.

При сильно отличающихся по твердости структурных составляющих материала и многократном воздействии нагрузки происходит вначале интенсивное изнашивание мягкой основы, вследствие этого повышается давление на выступающие твердые составляющие, они вдавливаются в мягкую основу, некоторые из них дробятся и перемещаются дополнительно под действием сил трения. В результате такого избирательного изнашивания поверхность обогащается твердыми структурными составляющими и приобретает строчечную структуру.

Влияние повышения температуры. Если по условиям эксплуатации или в результате трения температура поверхностных слоев выше температуры рекристаллизации металла, то поверхностный слой не наклепывается, а пребывает в состоянии повышенной пластичности.

Высокая температура и пластическая деформация способствуют диффузионным процессам; в итоге возможно обогащение поверхности некоторыми элементами (например, поверхности стали углеродом), коагуляция отдельных структурных составляющих, взаимное диффузионное растворение материалов деталей пар трения.

При интенсивном локальном повышении температуры (температурная вспышка) и последующем резком охлаждении окружающей холодной массой металла на поверхности могут образовываться закалочные структуры. Этому способствует высокое давление (от нагрузки), снижающее температуру, при которой происходят структурные превращения.

Пластическая деформация. Возможны высокие температурные градиенты и структурные превращения, каждое в отдельно-

сти и совместно, вызывают образование напряжений в материале, которые могут влиять на его разрыхление.

В условиях высоких нагрузок и температур возможно образование магмы-плазмы (рис. 3.2). Взаимодействие микроконтактов происходит за очень короткое время (10^{-7} – 10^{-8} с), в течение которого к контакту подводится большая энергия. В таких условиях материал поверхностного слоя преобразуется, в результате в зоне соударения неровностей образуется магма-плазма; процесс сопровождается эмиссией электронов.

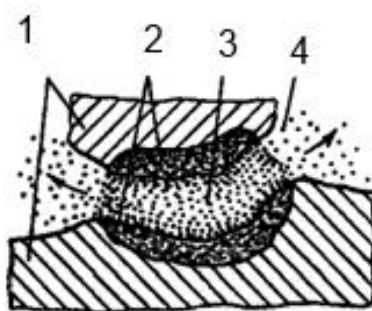


Рис. 3.2. Модель магмы-плазмы:

1 – исходная структура; 2 – расплавленная структура;
3 – плазма; 4 – электроны, движущиеся при трибоэмиссии

Химическое действие среды. В воздушной среде на обнаженных при изнашивании чистых металлических поверхностях образуются оксидные пленки. Эти пленки предохраняют поверхности от схватывания и связанного с ним глубинного вырывания и являются важным фактором не только при трении без смазочного материала, но и при полужидкой смазке.

Металлические поверхности, взаимодействуя с химически активными присадками в масле, покрываются пленками химических соединений, роль которых аналогична роли оксидных пленок.

Возможно насыщение поверхности углеродом в результате разложения смазочного материала при высокой температуре. Агрессивные жидкости и газовые среды активизируют изнашивание.

[Вернуться в оглавление](#)

3.3. Классификация процессов изнашивания

Механическое изнашивание возникает в результате механических взаимодействий контактирующих поверхностей. Оно бывает абразивным (газоабразивным), эрозионным (газоэрозионным), усталостным и кавитационным.

Изнашивание под действием электрического тока может быть отнесено к эрозионному (электроэрозионному) изнашиванию.

Разновидность этих процессов характеризуется специфическими явлениями, вызывающими разрушение микрообъемов материала при трении и неодинаковой интенсивности процесса.

Молекулярно-механическое изнашивание обусловлено адгезионными явлениями на пятнах фактического контакта. В результате этих явлений образуются мостики сварки, разрушаемые под действием тангенциальной силы. Разрушение может происходить по объему одного из элементов пары трения. Молекулярно-механическое изнашивание проявляется в виде схватывания и заедания.

Коррозионно-механическое изнашивание вызвано химическими процессами, обусловленными импульсным, тепловым и механическим взаимодействием на материал вступающих в контакт неровностей поверхностей трения. Проявляется в форме окислительного изнашивания и изнашивания при фреттинг-коррозии.

Абразивное изнашивание характеризуется разрушением поверхности детали, возникающим в результате взаимодействия с твердыми частицами при относительной скорости. Хотя, как правило, принимаются меры для того, чтобы избежать износа такого рода, обладающего большой интенсивностью, нередко существуют причины для его возникновения.

Происходит это вследствие недостаточной фильтрации смазочного материала или наличия абразива на поверхности трения, попадающего из окружающей среды. Часто абразивные частицы являются продуктами износа – твердыми образованиями структурных составляющих разрушенных микрообъемов. Некоторые детали машин работают непосредственно в абразивной среде (лемеха плугов, зубья ковша экскаватора и др.).

Этот вид изнашивания может происходить весьма интенсив-

но и на достаточно смазанных поверхностях, когда приложенная нагрузка передается от одной детали к другой не только через слой смазочного материала, но и через абразивные частицы.

Гидро- и газоабразивное изнашивание, когда износ происходит в результате воздействия твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа, является разновидностью абразивного изнашивания.

Эрозионное изнашивание – разрушение поверхности материала вследствие механического воздействия высокоскоростного потока жидкости, газа или пара. Разрушение металлов под воздействием электрических разрядов также относится к эрозии.

Эрозионное воздействие высокоскоростного потока жидкости, газа или пара в чистом виде складывается из трения сплошного потока и его ударов о поверхность. В результате трения происходит расшатывание и вымывание отдельных объемов материала. Скорость изнашивания в этом случае мала. Значительно большая роль принадлежит динамическому воздействию потока или струи. В зависимости от свойств материала возможны вырывы отдельных объемов или групп зерен. В пластичных материалах, обладающих способностью наклепываться, вначале накапливаются микропластические деформации отдельных участков, а когда способность к упрочнению исчерпается, эти участки разрушаются, вымываются. Жидкость, внедряющаяся при ударах в образовавшиеся микротрещины, ведет себя подобно клину, раздвигая боковые стенки.

Эрозия в начальный период на гладкой поверхности развивается весьма медленно, но после появления пораженных мест усиливается. Это объясняется повышением хрупкости поврежденного поверхностного слоя в связи с накоплением микротрещин, расклинивающим действием жидкости и усилением ударного действия из-за большого вихреобразования у поверхности.

Разрушению от эрозии часто подвергаются поверхности золотников гидравлических агрегатов, стальные и чугунные поршневые кольца авиационных двигателей.

Если поток содержит абразивные частицы, то изнашивание становится *эрозионно-абразивным*.

Эрозия и коррозия весьма часто протекают совместно. Коррозионно-эрозионное изнашивание представляет собой разно-

видность коррозионно-механического изнашивания. Роль обоих факторов зависит от соотношения механического и химического воздействия на материал. В качестве типичного примера можно привести гребные винты, разрушение которых происходит от коррозии и эрозии.

Усталостное изнашивание – результат циклического воздействия на микровыступы трущихся поверхностей. Отделение частицы износа может происходить в результате наклепа поверхностного слоя, который становится хрупким и разрушается (иногда его называют *изнашивание при хрупком разрушении*).

Различают контактную усталость и усталостное изнашивание.

Контактная усталость возникает при качении без проскальзывания и проявляется в развитии местных очагов разрушения (питтинг).

Усталостное изнашивание характерно для трения скольжения и проявляется в отделении микрообъемов поверхности.

В сопряжениях кулачок – ролик, зубчатые передачи, опоры качения и другие могут иметь место оба вида разрушения. При большом проскальзывании основную роль играет изнашивание, которое интенсивнее, чем образование питтинговых разрушений поверхности.

Кавитационное изнашивание обусловлено образованием в движущемся по поверхности твердого тела потоке жидкости пустот в виде пузырей, полос и мешков, наполненных парами, воздухом или газами, растворенными в жидкости или выделившимися из нее. Это происходит по следующим причинам. В движущемся с большой скоростью потоке при его сужении или наличии препятствий на его пути давление может упасть до давления, соответствующего давлению парообразования при данной температуре. При этом, в зависимости от сопротивления жидкости растягивающим усилиям может произойти разрыв, нарушение сплошности потока. Образующаяся пустота заполняется паром и газами, выделившимися из жидкости. Парогазовые пузыри размерами порядка десятых долей миллиметра, перемещаясь вместе с потоком, попадают в зоны высоких давлений. Пар конденсируется, газы растворяются, и в образовавшиеся пустоты с громадным ускорением устремляются частицы жидкости; происходит сопровождаемое ударом восстановление сплошного потока.

Кавитация наблюдается в трубопроводах, в гидромоторах и в потоках, обтекающих лопасти центробежных и пропеллерных насосов и лопастей гидравлических турбин и гребных винтов. Явление кавитации вызывает вибрации, стуки и сотрясения, что приводит к расшатыванию крепежных связей, обрыву болтов, смятию резьб, фрикционной коррозии стыков, нарушению уплотнений и усталостным поломкам.

Кавитация понижает КПД машин и гребных винтов и вызывает непосредственное разрушение поверхностей деталей в зоне ее действия.

Предпосылки для наступления и протекания кавитационного изнашивания следующие. При замыкании до полного исчезновения парогазовых пузырей у поверхности детали последняя подвергается микроскопическим гидравлическим ударам.

Под воздействием ударов поверхность металла деформируется и наклепывается на малую глубину. Многократно повторяющиеся удары вызывают разупрочнение, перенаклеп материала на отдельных микроучастках, сопровождающееся возникновением очагов разрушения в виде трещин. Разрушается прежде всего менее прочная структурная составляющая (в сталях – феррит; в чугунах – графитовые включения).

Закалка с нагревом ТВЧ, химико-термическая обработка, поверхностное упрочнение, в том числе твердые наплавки, способствуют повышению кавитационной стойкости.

Изнашивание при схватывании и заедании – явление прочного соединения металлов в результате взаимного трения или совместного деформирования при температуре ниже температуры рекристаллизации. При этом образуются прочные металлические связи в зонах непосредственного контакта поверхностей. В местах схватывания исчезает граница между соприкасающимися телами, происходит сращивание одно- и разноименных металлов.

Заедание – наиболее яркая форма проявления схватывания. При этом образуются широкие и глубокие борозды с неровными краями, иногда слившиеся; присутствуют крупные наросты; возможно оплавление поверхности. Может произойти полное заклинивание деталей.

Единой точки зрения на механизм процесса схватывания нет. Наиболее правдоподобной гипотезой является следующая.

Для образования прочных металлических связей между металлами в холодном состоянии необходимо отсутствие на соприкасающихся поверхностях смазки, пленок и загрязнений. Это условие признается в настоящее время обязательным.

Один и тот же металл, в зависимости от свойств пленок на его поверхности, может обладать способностью к схватыванию или такую способность не проявлять.

Адгезионное действие при трении аналогично схватыванию.

Схватывание между металлическими поверхностями при некоторых режимах трения без смазочного материала возникает сравнительно легко. Пластическое деформирование на площадках фактического контакта и внедрение одной поверхности металла в другую создают условия для сдирания оксидных и адсорбированных пленок масел, жиров, газов и влаги и образования узлов схватывания. Узел схватывания – это местное соединение поверхностей, образующихся при трении в результате схватывания. Местное соединение поверхностей при трении вследствие адгезии называют *узлом адгезии*.

Необходимой предпосылкой для образования узла схватывания на поверхности трения является разрушение смазочной пленки. Оно может произойти под действием высокой температуры при упругой деформации поверхностных слоев, при наличии значительной пластической деформации или совместном действии повышенной температуры и пластической деформации.

Схватывание материалов проявляется в самых разнообразных формах. Начинается оно с субмикроскопических повреждений, переходя постепенно к локализованному разрушению поверхностного слоя и глубинному вырыванию. Затем разрушение может приобрести лавинный характер.

Окислительное изнашивание происходит в том случае, когда на соприкасающихся поверхностях образуются пленки оксидов, которые в процессе трения разрушаются и вновь образуются. Продукты износа состоят из оксидов. От других видов коррозионно-механического изнашивания окислительное изнашивание отличается отсутствием агрессивной среды, протекает при нормальных и повышенных температурах, при трении без смазочного материала или при недостаточном его количестве. Интенсивность изнашивания может быть весьма значительной, но поверх-

ности трения сохраняют малую шероховатость. Это объясняется тем, что оксиды препятствуют схватыванию поверхностей. При обычных температурах окисление поверхностей активизируется пластической деформацией.

Для окислительного изнашивания необходимо, чтобы промежуток времени между последовательными разрушениями пленки был достаточен для образования пленки относительно большой толщины. В случае циклического разрушения оксидов высокой твердости изнашивание будет иметь характер абразивного.

Одним из методов борьбы с окислительным изнашиванием является создание поверхностей трения с высокой твердостью.

Окислительному изнашиванию подвергаются калибры, детали шарнирно-болтовых соединений; тяг и рычагов механизмов управления; шарнирно-болтовых соединений в подвесных устройствах машин, работающих без смазочного материала - металлические колеса фрикционных передач и чашки вариаторов, а также некоторые детали в парах трения качения.

Повышение температуры способствует росту оксидных пленок, а вибрация – их разрушению. Интенсивное окислительное изнашивание в подобных условиях встречается, например, в деталях крепления выхлопных коллекторов авиационных двигателей внутреннего сгорания. В ряде случаев интенсивность окислительного изнашивания можно уменьшить, сменив смазочный материал, понизив температуру узла. Необходимо отметить, что применение коррозионно-стойких сталей не дает дополнительно эффекта в условиях окислительного изнашивания, кроме этого аустенитные стали склонны к схватыванию.

Изнашивание при фреттинг-коррозии – это процесс разрушения плотно контактирующих поверхностей пар металл-металл или метал-неметалл в результате малых колебательных перемещений. Для возбуждения фреттинг-коррозии достаточны перемещения поверхностей с амплитудой 0,025 мкм. Разрушение заключается в образовании на соприкасающихся поверхностях мелких язвин и продуктов коррозии в виде пятен, налета и порошка. Этому виду изнашивания подвержены не только углеродистые, но и коррозионно-стойкие стали в парах трения сталь-сталь (могут быть как одноименные, так и разноименные), сталь-олово или алюминий, сурьма, а также чугун-бакелит или хром и

многие другие пары трения.

Механизм изнашивания при фреттинг-коррозии в упрощенном виде представлен на рис. 3.3.

Первоначальное контактирование деталей происходит в отдельных точках поверхности (*I*). При вибрации оксидные пленки в зоне фактического контакта разрушаются, образуются небольшие каверны, заполненные оксидными пленками (*II*), которые постоянно увеличиваются в размерах и сливаются в одну большую каверну (*III*). В ней повышается давление окисленных частиц металла, появляются трещины. Некоторые трещины сливаются, и происходит откалывание отдельных объемов металла. Частицы оксидов производят абразивное воздействие. В результате действия повышенного давления и сил трения частиц оксидов повышается температура и образуются белые твердые нетравящиеся структуры в отколовшихся частицах и на поверхности каверн.

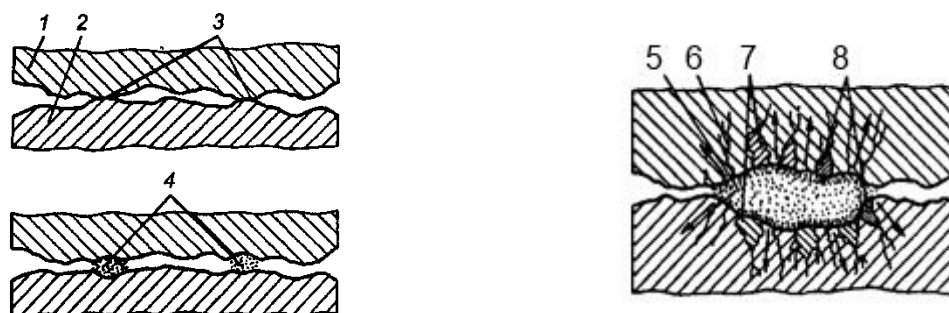


Рис. 3.3. Механизм изнашивания металлических поверхностей при фреттинг-коррозии:

- 1, 2 – контактирующие детали; 3 – точки контакта поверхностей; 4 – мелкие зарождающиеся каверны; 5 – общая большая каверна; 6 – трещины; 7 – отколовшиеся объемы металла; 8 – отколовшиеся частицы с твердой структурой

Вследствие малой амплитуды перемещения соприкасающихся поверхностей повреждения сосредоточиваются на небольших площадках действительного контакта. Продукты износа не могут выйти из зоны контакта, в результате возникает высокое давление и увеличивается их абразивное действие на основной металл.

Фреттинг-коррозия осуществляется также в вакууме, в среде

кислорода, азота и гелия. Существенную роль в процессе фреттинг-коррозии играет окисление поверхностей трения или металлических продуктов разрушения. Фреттинг-коррозия представляет особый вид разрушения металлов и их сплавов в мало- и неагрессивных коррозионных средах под одновременным воздействием механического и химического факторов.

Необходимые для протекания этого процесса относительные микроперемещения сопряженных поверхностей совершаются вследствие деформации деталей под нагрузкой и вибрации их, а также колебаний, происходящих в упругих системах.

Фреттинг-коррозия имеет место на сопряженных поверхностях валов и напрессованных на них дисков, колес, муфт и колец подшипников качения на осях и ступицах колес подвижного состава железных дорог, на напрессованных в картере вкладышах подшипников, на пригнанных поверхностях шпонок и их пазов, на затянутых стыках, в заклепочных соединениях и др.

Как и при других видах изнашивания, универсальных средств борьбы с фреттинг-коррозией нет. Если исходить из того, что взаимное микроперемещение поверхностей не может быть исключено вследствие упругости материала, то для борьбы с фреттинг-коррозией следует: уменьшать микросмещения; снизить силы трения; сосредоточить скольжения в промежуточной среде.

Водородное изнашивание зависит от концентрации водорода в поверхностных слоях трущихся деталей. Водород выделяется из материалов пары трения или из окружающей среды (смазочного материала, топлива, воды и др.) и ускоряет изнашивание. Водородное изнашивание обусловлено следующими процессами, происходящими в зоне трения: интенсивным выделением водорода при трении в результате трибодеструкции водородсодержащих материалов, создающих источник непрерывного поступления водорода в поверхностный слой стали или чугуна; адсорбцией водорода на поверхности трения; диффузией водорода в деформируемый слой стали, скорость которой определяется градиентом температур и напряжений, что создает эффект накопления водорода в процессе трения.

Особым видом разрушения поверхности, связанным с одновременным развитием большого числа зародышей трещин по всей зоне деформирования и эффектом накопления водорода, ха-

раактерным для разрушения, является мгновенное образование мелкодисперсного порошка материала.

Водородное изнашивание имеет особое значение для следующих отраслей техники: авиационной (тормозные колодки и барабаны колес); железнодорожного транспорта (пластмассовые колодки в тормозных устройствах); морского флота (узлы трения, самосмазываемые водой, например гребные валы и др.); деревообрабатывающей промышленности (инструмент и рабочие органы машин); техника, применяемая на Севере, и др.

Усталость – процесс постепенного возникновения и развития трещин под влиянием многократных повторных силовых воздействий на металл.

Место, где зародилась трещина усталости, называется *фокусом излома*. Под действием переменной нагрузки трещина медленно распространяется в глубь тела детали, образуется зона усталостного развития излома. На изломе эта зона имеет ступеньки, рубцы. Когда уцелевшее сечение тела становится меньше допустимого, деталь разрушается.

Характер усталостного разрушения зависит от вида напряженного состояния, в связи с чем различают усталость при растяжении-сжатии, изгибе, кручении и контактную усталость.

Наиболее характерными деталями, подверженными усталостному разрушению, являются коленчатые валы, шатуны, шатунные болты, зубья шестерен, кольца подшипников, пружины, торсионные валы.

Чаще всего напряжения в деталях изменяются во времени по синусоидальному закону или могут быть представлены в виде суммы синусоидальных гармоник, что значительно облегчает расчеты.

На основании результатов усталостных испытаний строят кривую усталости. Кривая усталости – график, характеризующий зависимость между максимальными напряжениями (деформациями), или амплитудами цикла, и циклической долговечностью одинаковых образцов, построенный либо при равных для всех образцов средних напряжениях (деформациях, амплитудах) цикла, либо при одинаковом для всех образцов коэффициенте асимметрии цикла.

[Вернуться в оглавление](#)

3.4. Контрольные вопросы

1. Что является одной из основных причин выхода из строя деталей машин?
2. Что такое триботехника?
3. Что такое изнашивание?
4. Что такое износостойкость?
5. На какие три явления может быть разделен процесс изнашивания?
6. Чему способствует пластическая деформация при температуре ниже температуры рекристаллизации?
7. В результате чего возникает механическое изнашивание?
8. Чем характеризуется абразивное изнашивание?
9. Что представляет собой эрозионное изнашивание?
10. Что такое усталость?

[Вернуться в оглавление](#)

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ

Износостойкость, усталостная прочность и другие эксплуатационные характеристики деталей машин зависят не только от химического состава и структуры материала, из которого изготовлены детали, но и, как уже указывалось ранее, от качества поверхностного слоя деталей, что в конечном итоге определяется технологией их изготовления.

[Вернуться в оглавление](#)

4.1. Влияние физико-механических свойств поверхности

На процессы трения и изнашивания оказывают влияние такие физико-механические свойства поверхностного слоя, как твердость и остаточные напряжения, глубина и степень деформационного упрочнения, структурное состояние металла.

Предварительное упрочнение (повышение твердости) металла поверхностного слоя способствует повышению износостойкости детали. При этом уменьшается истирание и смятие поверхностей при непосредственном контакте, а также взаимное внедрение, возникающее при механическом и молекулярном взаимодействии. Повышение твердости препятствует развитию совместной пластической деформации металлов трущихся деталей, способствующей схватыванию, являющемуся наиболее интенсивным видом изнашивания.

Предварительный наклеп активизирует поверхностный слой, что приводит к росту скоростей диффузии и химической реакции. При этом с большей скоростью в поверхностном слое образуются твердые химические соединения металла с кислородом, образуя химические соединения, характерные для окислительного изнашивания, протекающего с меньшей интенсивностью.

Наличие в поверхностном слое наклепа, снижающего начальный износ, оказывает существенное влияние на общий износ деталей в процессе эксплуатации.

Важно при этом отметить, что положительное влияние предварительного наклепа на износостойкость деталей проявляется как в условиях жидкостного трения, так и в условиях сухого.

В период приработки на трущихся поверхностях формируется не только оптимальная шероховатость, но и оптимальная микротвердость металла поверхностного слоя.

В тех случаях, когда микротвердость поверхностного слоя до начала процесса изнашивания невелика, а изнашивание происходит при больших нагрузках, в процессе приработки микротвердость увеличивается и продолжительность приработки определяется интенсивностью ее роста (рис. 4.1.). Если же микротвердость металла поверхностного слоя до изнашивания достаточно велика, то продолжительность приработки зависит от скорости изнашивания и пластического смятия неровностей поверхности. При этом за счет изнашивания наиболее упрочненного поверхностного слоя может произойти снижение микротвердости до некоторого оптимального значения, соответствующего пределу текучести, при котором обеспечивается равенство несущей способности поверхности и внешней нагрузки. В последнем случае достижение оптимальной микротвердости непосредственно не связано с периодом приработки и может произойти до его окончания или в зоне установившегося изнашивания.

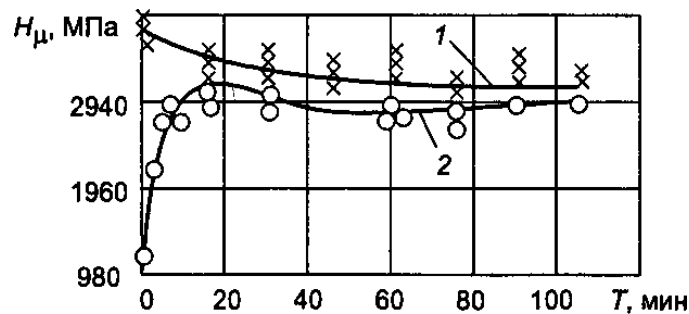


Рис. 4.1. Изменение микротвердости образцов из стали 20 в процессе изнашивания

Положительное влияние наклепа на износостойкость трущихся поверхностей проявляется до определенной степени первоначального наклепа. Если при предварительной обработке трущейся поверхности степень пластической деформации поверхностного слоя превосходит определенное для данного металла значение, то в металле начинается процесс его разрыхления (разрыв межуатомных связей по плоскости скольжения и субмикроскопическое нарушение сплошности металла), происходящий одновременно с продолжающимся процессом упрочнения.

При дальнейшем увеличении нагружения переупрочненные и охрупченные зоны металла отслаиваются от его основной массы, начинается шелушение и ускоренный износ металла. Таким образом, зависимость износостойкости от глубины и степени наклепа поверхностного слоя немонотонная: максимальное снижение износа достигается после обработки с определенными (оптимальными) значениями степени глубины наклепа

Поэтому упрочнение металла поверхностного слоя в процессе механической обработки деталей и при специальных упрочняющих операциях (обкатка роликами и шариками, дробеструйный наклеп и др.) следует производить при строго регламентированном наклепе, что предотвращает возникновение перенаклепа. Необходимо также учитывать, что наклеп – явление обратимое, т.е. при повышении температуры возможно уменьшение или полное снятие наклепа в металле поверхностного слоя. В связи с этим наличие наклепа при определенных условиях изнашивания не эффективно (например, сухое трение скольжения при высоких скоростях).

При выполнении упрочняющей обработки в поверхностном слое детали возникает не только упрочнение (повышение твердости), но и происходит образование остаточных напряжений. В частности, при механической обработке пластическая деформация способствует образованию остаточных напряжений сжатия.

При трении и изнашивании в металле поверхностного слоя имеют место значительные пластические деформации, вызывающие интенсивный наклеп и большие остаточные напряжения сжатия.

В начальный период трения деталей в их поверхностном слое остаточные напряжения, созданные предшествующей обработкой и являющиеся по своей природе упругими, снимаются под действием протекающих пластических деформаций независимо от их знака.

Одновременно в поверхностном слое в результате трения возникают остаточные напряжения сжатия, которые зависят от условий трения и пластических свойств трущихся металлов и не зависят от величины и знака остаточных напряжений, созданных предшествующей обработкой и сохранившихся в поверхностном слое до начала трения.

В процессе трения и изнашивания в металле поверхностного слоя протекает интенсивная пластическая деформация, которая не может быть создана никакой механической обработкой. Совершенно естественно, что пластическая деформация полностью снимает остаточные напряжения в поверхностном слое, сохранившиеся в нем до изнашивания, поэтому такие напряжения не успевают проявить своего влияния на изнашивание деталей.

Напряженное состояние всего сечения детали (например, растягивающие внутренние напряжения в стенках втулки, напрессованной на другую деталь) может оказать свое воздействие на характер и интенсивность изнашивания. Возможным является влияние напряженного состояния при изнашивании в условиях питтинга, при котором большое значение имеют явления усталости металла.

Усталостная прочность деталей машин зависит от упрочнения металла поверхностного слоя. Упрочнение металла до определенных пределов уменьшает амплитуду циклической пластической деформации и предотвращает возникновение субмикроскопических нарушений сплошности (разрыхления), порождающих развитие усталостных трещин.

Кроме этого, создание упрочненного наклепанного поверхностного слоя препятствует росту существующих и возникновению новых усталостных трещин. Такой слой может значительно нейтрализовать вредное влияние наружных дефектов и шероховатости поверхности.

У деталей с твердым упрочненным слоем после циклических нагружений, из-за которых в металле возникают напряжения, превышающие предел выносливости, усталостные трещины зарождаются не в упрочненном слое детали, а в ее глубине. Образование подобных трещин под упрочненным слоем и их дальнейшее увеличение происходят при более высоких напряжениях и большем числе циклов нагружения, чем в условиях отсутствия упрочнения.

Влияние перечисленных причин приводит к заметному повышению усталостной прочности деталей машин в результате упрочнения их поверхностного слоя.

Как показывают результаты многочисленных исследований, например при наклепе металла поверхностного слоя, повышение

усталостной прочности деталей машин, работающих в условиях нормальной комнатной температуры, может достигнуть 25–30 %.

Знак и величина остаточных напряжений также оказывают большое влияние на усталостную прочность деталей машин. Остаточные сжимающие напряжения резко повышают усталостную прочность деталей, поэтому способы и режимы обработки, обеспечивающие формирование остаточных напряжений, широко применяются в практике.

Остаточные напряжения сжатия в большей мере повышают предел выносливости, чем снижают его такие же по величине остаточные напряжения растяжения. Для сталей повышенной твердости повышение предела выносливости благодаря действию сжимающих напряжений достигает 50 %, а снижение его под действием растягивающих – 30 %.

Особенно велико влияние остаточных напряжений на предел выносливости стали, когда разница в прочности стали при растяжении и сжатии большая. Поэтому предел выносливости твердых сталей зависит от величины и знака остаточных напряжений особенно сильно, в то время как у мягких и пластичных сталей эта зависимость проявляется в меньшей степени.

При высокой температуре нагрева и циклическом нагружении остаточные макронапряжения независимо от их значения и знака мало или вообще не оказывают влияния на сопротивление усталости. Это обусловлено прежде всего быстрой релаксацией остаточных напряжений при нагреве деталей.

Теплота, выделяющаяся в зоне резания при различных методах механической обработки в определенных условиях (напряженные режимы резания, притупление режущего инструмента и засаливание абразивного круга чрезмерно высокой твердости, недостаточное охлаждение и др.), вызывает структурные изменения металла поверхностного слоя. При обработке металлов, воспринимающих закалку, может произойти частичная закалка металла поверхностного слоя, а при обработке закаленных металлов – отпуск различной степени.

Структурные изменения металла поверхностного слоя при его механической обработке и, в частности, ожога шлифуемой поверхности являются серьезной причиной снижения качества деталей.

Участки мягкого металла имеют пониженную износостойкость. Обычно в зонах отпущенного металла, имеющего меньший удельный объем, развиваются остаточные напряжения растяжения, снижающие усталостную прочность деталей. При этом на границах участков с измененной структурой часто образуются шлифовочные трещины, являющиеся очагами усталостных разрушений.

На усталостную прочность оказывают влияние размер зерна и границы зерен металла детали. При внутризеренном разрушении границы зерен играют роль барьеров, препятствующих распространению трещин усталости. Поэтому мелкозернистая структура должна оказывать более высокое сопротивление усталости, чем крупнозернистая. В крупнозернистом металле трещина распространяется на большее расстояние (пропорционально размеру зерна), чем в мелкозернистом.

Однако если термическая обработка, приводящая к измельчению зерна, ослабляет прочность границ зерен, то распространение трещин через границы зерен облегчается и преимущества мелкозернистой структуры по сравнению с крупнозернистой не наблюдаются.

Состояние поверхности металлических материалов, кристаллическая структура и наличие различных структурных дефектов сказываются на процессах коррозии металлов.

Установлено, что чем выше плотность упаковки кристаллической структуры, тем ниже скорость коррозии.

С увеличением шероховатости поверхности коррозионная стойкость металлов снижается, так как облегчается смачивание и увеличивается число активных мест.

На гладкой поверхности после тонкой обработки (шлифовки, полировки) формируется более плотная и однородная пленка оксидов, защищающих металл от коррозии. При образовании пленок на поверхности имеет значение соответствие кристаллографической структуры металла и пленки. Скорость коррозии максимальна на дефектах структуры, переходных областях и границах зерен.

Величина зерна оказывает незначительное влияние на скорость коррозии. Только для случая межкристаллитной коррозии увеличение размера зерна увеличивает скорость коррозии, так

как общая протяженность границ зерен, где идет локальное разрушение, становится меньше.

Деформация металла в процессе нагрева может вызывать нарушение сплошности пленок и увеличивать по этой причине скорость коррозии.

Наиболее опасным видом коррозии является *коррозионное растрескивание* при одновременном воздействии коррозионной среды и растягивающих внешних или внутренних напряжений. Установлено, что внутренние напряжения растяжения понижают, а сжатия – повышают сопротивление коррозионному растрескиванию сплавов. Причинами, вызывающими внутренние напряжения при механической обработке, являются пластическая деформация, нагрев и связанные с этим фазовые превращения в поверхностных слоях, а также наводороживание сталей, происходящее в кислых средах. Коррозионное растрескивание характеризуется образованием межкристаллитных, транскристаллитных и смешанных трещин с разветвлениями, направление которых перпендикулярно растягивающим напряжениям.

Поэтому создание в поверхностных слоях металлов сжимающих напряжений путем обдувки дробью или обкатки роликом, поверхностное упрочнение токами высокой частоты или дробеструйным наклепом, применение защитных покрытий увеличивает коррозионную стойкость сплавов.

При поверхностном наклепе или дробеструйной обработке на поверхности металла возникают напряжения сжатия, которые эффективно предотвращают коррозионное растрескивание, пока сжатые слои остаются сплошными и не повреждаются в результате общей коррозии

В процессе трения шероховатость поверхности изменяется, стремясь к некоторому стабильному значению. Исходная шероховатая поверхность будет выглаживаться, а исходная гладкая становиться шероховатой. При одинаковых внешних условиях трения одноименных материалов после приработки в течение нескольких часов обе шероховатости будут одинаковыми, приняв так называемое *значение равновесной шероховатости*.

Как высокие и острые, так и весьма пологие микронеровности под влиянием сил трения стремятся к некоторому промежуточному значению. Очевидным является то, что высокие острые

микронеровности сглаживаются под влиянием напряжений, возникающих на выступах. Причины, приводящие к разрушению гладких поверхностей, имеющих пологие микронеровности, требует дополнительного пояснения.

Невозможность существования гладких поверхностей базируется на гипотезе «пленочного голодания». Эта гипотеза исходит из необходимости наличия защитной пленки на поверхности трения и учитывает время процессов формирования защитной пленки и ее истирания, зависящее от шероховатости. Образование пленки происходит или вследствие осаждения на поверхности веществ из окружающей среды, или вследствие разрыхления поверхностного слоя твердого тела. Пленка извне может образовываться за счет жидкой или газообразной фазы. При этом образование пленки на гладких поверхностях затруднено.

Малая скорость восстановления пленки и быстрое ее изнашивание на гладких поверхностях обуславливает невозможность существования поверхностей, имеющих высокую гладкость, т.е. большие пятна контакта. Процесс формирования равновесной шероховатости схематически изображен на рис. 4.2. Слева показан контакт идеально гладких поверхностей. В процессе трения возникающие микрорезы постепенно сглаживаются и неровности доходят до равновесной конфигурации. Очень высокие и острые выступы, изображенные на правой части графика, постепенно сглаживаются и также приходят к равновесной шероховатости.

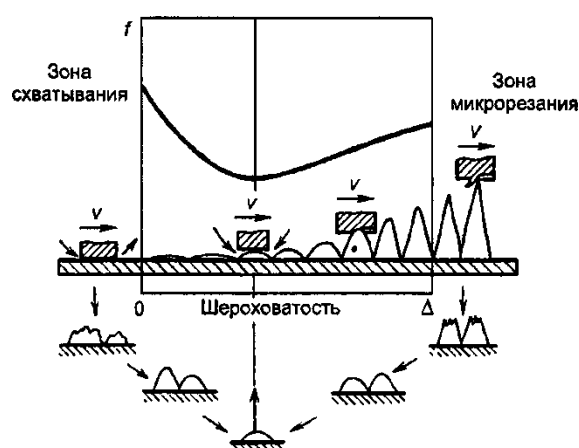


Рис. 4.2. Схема формирования равновесной шероховатости

Если в последнем случае (правая часть кривой) протекание процесса зависит от механических свойств трущихся тел (твердо-

сти, предела текучести), то нарушение защитной роли пленки (левая часть кривой) зависит от молекулярных, атомарных характеристик, поверхностной энергии, химического сходства, а главное от газового или жидкостного голодания, возникающих вследствие сужения зазора.

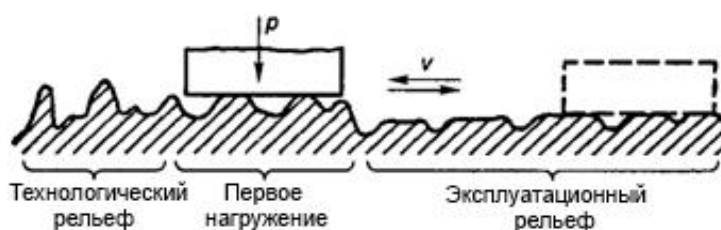
Исходная шероховатость (технологический микрорельеф), определяемая технологией изготовления деталей, влияет на износостойкость сопряжения в основном только через приработку. Под *приработкой* понимается процесс изменения микрогеометрии поверхности трения и физико-механических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении работы трения, температуры и интенсивности изнашивания.

В процессе приработки микронеровности технологического рельефа подвергаются воздействию нормальных и касательных напряжений. Интенсивным воздействиям будут подвержены наиболее высокие и острые микронеровности, которые за счет больших напряжений будут либо срезаться, либо пластически деформироваться. Пологие, гладкие микронеровности также будут испытывать интенсивное воздействие при трении за счет большой адгезии и «пленочного голодания», что приведет к значительному изменению их геометрического очертания. Поэтому в совокупности микронеровностей, имеющих различную высоту и радиус закругления, в более благоприятных условиях окажутся промежуточные по своим размерам микронеровности. Они будут превалирующими на приработанной поверхности. Равновесная шероховатость для установившегося процесса соответствует минимальному значению сил трения при прочих неизменных условиях. В процессе приработки исходный (технологический) микрорельеф преобразуется в эксплуатационный (рис. 4.3, а, б).

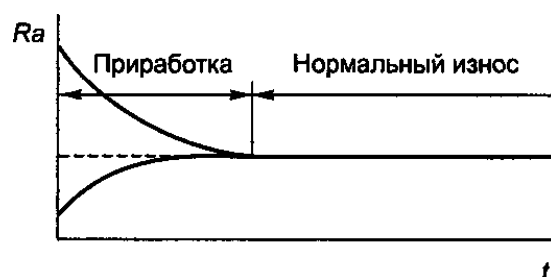
Повышенному начальному износу в период приработки в некоторых случаях способствует возникновение в точках контакта высоких мгновенных температур и срыв оксидной пленки, покрывающей металлы, что сопровождается молекулярным сцеплением трущихся металлов и образованием узлов схватывания.

Рассматривая дифференцирование характеристики шероховатости поверхности, необходимо отметить, что высота микронеровностей поверхности оказывает сложное влияние на ин-

тенсивность изнашивания. При очень малых значениях Rz создаются благоприятные условия для схватывания и интенсивного молекулярно-механического взаимодействия. С увеличением высоты микронеровностей доля молекулярной составляющей силы трения убывает, но при этом возрастает механическая составляющая. В результате с увеличением Rz увеличивается износ поверхности. При больших значениях высот микронеровностей и относительно малой твердости противолежащей поверхности изнашивание может принять абразивный характер.



а)



б)

Рис. 4.3. Схема трансформации технологического рельефа поверхности в эксплуатационный

Шероховатость и волнистость поверхности для процесса изнашивания не ограничиваются влиянием высоты неровностей и размеров фактической поверхности контакта, а связаны также с шагом и формой неровностей. Установлено, что тонкие и многочисленные неровности обеспечивают большую износостойкость, чем крупные неровности большого шага.

Получение при обработке поверхностей трения микронеровности с высотой R_{max} , равной «эксплуатационной», не является надежным показателем оптимальности микрогеометрии, обеспечивающей минимальный износ в период приработки.

Под термином «оптимальная микрогеометрия» необходимо понимать оптимальные значения всех характеристик микрогеометрии или какого-то комплексного выражения, наиболее полно отражающего свойства шероховатой поверхности и ее влияния на износостойкость.

В качестве такого выражения целесообразно использовать комплексную безразмерную характеристику шероховатости несущей поверхности.

Исходя из этого, можно сделать предположение о том, что отклонение одной из характеристик от общей закономерности изменения должно компенсироваться изменением других характеристик, входящих в безразмерный комплекс, а в итоге общая закономерность изменения остается постоянной для конкретного метода обработки. Влияние направления микронеровностей на износостойкость неодинаково для различных условий трения и разных размеров микронеровностей.

При граничном трении поверхностей с малыми микронеровностями, параллельном направлении микронеровностей и скорости движения, возникающие схватывание и износ оказываются больше, чем при перпендикулярном направлении. Для поверхностей с большой шероховатостью, когда схватывание не происходит, параллельное направление микронеровностей дает меньший износ.

Коэффициент трения тоже связан с направлением микронеровностей и их высотой. При сочетании поверхностей, имеющих одинаковое направление микронеровностей при их перпендикулярном направлении к движению, коэффициент трения достигает наибольшего значения. При перпендикулярном направлении микронеровностей трущихся поверхностей или при их хаотичном расположении, что наблюдается при суперфинишировании, коэффициент трения минимален.

При рассмотрении влияния микрогеометрии на усталостную прочность деталей машин необходимо иметь в виду, что впадины микрорельефа являются концентраторами напряжений. С этой точки зрения особенно опасны глубокие впадины с малым радиусом закругления дна. Такие впадины играют роль мощнейших концентраторов напряжений, резко снижающих усталостную прочность.

[Вернуться в оглавление](#)

4.2. Контрольные вопросы

1. Чему способствует предварительное упрочнение (повышение твердости) металла поверхностного слоя?
2. Что происходит с коррозионной стойкостью металлов с увеличением шероховатости поверхности?
3. Какой вид коррозии является наиболее опасным?
4. Что понимается под термином «оптимальная микрогеометрия»?
5. В чем заключается гипотеза «пленочного голодания»?
6. Что сказывается на процессах коррозии металлов?
7. Что оказывает влияние на усталостную прочность?
8. Что возникает при выполнении упрочняющей обработки в поверхностном слое детали?

[Вернуться в оглавление](#)

ГЛАВА 5. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ

В настоящее время существует большое число различных способов придания различных эксплуатационных свойств поверхностным слоям деталям машин. Мы рассмотрим, лишь некоторые из них. Здесь не рассматриваются способы упрочнения методом поверхностного пластического деформирования (ППД), так они подробно проведены и разобраны в учебных пособиях, написанных д.т.н., проф. В. Ю. Блюменштейном с учениками.

[Вернуться в оглавление](#)

5.1. Свойства гальванических покрытий

Гальванические покрытия, широко применяемые в машиностроении, не только защищают металлические материалы от коррозии, но и придают их поверхности ряд ценных физико-механических свойств: твердость, износостойчивость, электропроводность, паяемость, отражательную способность, обеспечивают изделиям декоративную отделку. Вид и толщину покрытия выбирают в соответствии с требованиями конструкторско-технологической документации, определяемыми при разработке изделия в зависимости от условий его эксплуатации или хранения.

По назначению металлические покрытия делятся на защитные, защитно-декоративные, декоративные и функциональные. Деление покрытий по назначению носит условный характер, и целый ряд покрытий специального назначения могут применяться для декоративной отделки.

В таблице 5.1 приведены данные о твердости гальванических покрытий, получаемых в разнообразных электролитах, с различной природой вводимых в электролит добавок.

Твердость покрытий, электрические и электрохимические свойства, шероховатость покрытий, наводороживание, способность к пайке, электроизоляционные и магнитные свойства определяют назначение покрытий.

Защитные покрытия. Основная область применения цинковых и кадмиевых покрытий – защита изделий из стали и чугуна от атмосферной коррозии. Так как цинк имеет более отрицательный потенциал, чем железо, то в контакте с ним, при наличии

коррозионной среды (КС), в порах цинкового покрытия образуется гальванический элемент, в котором железо служит катодом, а разрушению подвергается цинк-анод (рис. 5.1).

Таблица 5.1

Твердость гальванических покрытий

Покрытие	Твердость, ГПа	Покрытие	Твердость, ГПа
Железное	1,5–7,5	Хромовое твердое	8,3–11,0
То же после цементации	До 8,6	Цинк	0,39–0,5
		Золото-медь	2,4–2,5
Золотое	0,4–0,98	Золото-кобальт	1,19–1,6
Кадмиевое	0,5–1,5	Золото-никель	3,4–3,8
Медное	0,8–3,0	Медь-олово	4,9–5,0
Никелевое	2,5–3,5	Никель-фосфор	6,0–6,0
Никелевое блестящее	3,5–5,5	То же после термообработки	9,0–10,6
Никелевое твердое	10–12		
Оловянное	0,12–0,50	Олово-никель	6,0–6,9
Палладиевое	2,5–4,0	Олово-медь	4,0–4,9
Родиевое	5,0–9,5	Палладий-никель	3,7–5,5
Рутениевое	8,0–9,0	Серебро-палладий	1,2–2,3
Свинцовое	0,05–0,12	Серебро-никель	1,6–1,6
Серебряное	0,6–1,4	Серебро-сурьма	1,0–1,26
Хромовое молочное	4,5–6,0	–	–

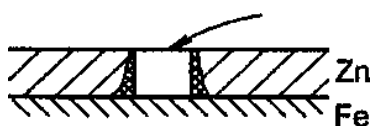


Рис. 5.1. Схема коррозии анодных покрытий

Таким образом, цинковое покрытие является анодным и защищает черные металлы не только механически, но и электрохимически. Электродные потенциалы кадмия и железа близки друг к другу, поэтому при эксплуатации изделий с кадмиевым покрытием характер защиты (механический или электрохимический) в большой степени зависит от характера среды и условий эксплуатации. Кадмирование применяется в тех случаях, когда изделия из черных и цветных металлов подвергаются действию атмосферы или жидкой среды, содержащей хлориды (морская вода), а

также в тропических условиях эксплуатации, где кадмий защищает изделия электрохимически, являясь анодным покрытием.

В промышленной атмосфере, насыщенной диоксидом серы, цинковые покрытия более коррозионно-устойчивы, чем кадмиевые.

Сравнительно высокая стойкость цинка в атмосфере и доступность обеспечили его широкое применение для защиты стальных листов, проволоки, крепежа деталей машин, водопроводных труб, резервуаров, бензинопроводов. Цинковые покрытия с последующим нанесением жаростойкого лака, содержащего порошки алюминия или цинка в качестве ингибиторов коррозии, могут использоваться для защиты стальных глушителей и выхлопных труб.

Продолжительность защитного действия цинковых и кадмиевых покрытий зависит в основном от характера коррозионной среды, температуры, толщины покрытий.

Начало коррозии цинка и кадмия может быть значительно замедлено после обработки покрытых изделий хроматными растворами.

С целью повышения коррозионной стойкости цинковых покрытий их получают из электролитов с блескообразующими добавками, которые снижают пористость покрытий, либо получают легированные никелем, кобальтом, молибденом, железом цинковые покрытия. Покрытие сплавом цинк-железо с черной хроматной пленкой отличается высокой коррозионной стойкостью и может использоваться в камерах автомобильного двигателя, где температура достигает 100 °С. Беспористые цинковые покрытия можно получить, используя нестационарные режимы электролиза, что также позволяет снизить толщину цинковых покрытий.

Толщина цинкового покрытия выбирается в зависимости от условий эксплуатации изделий и устанавливается ГОСТ 9.303-84.

Для цинкования используются электролиты различного типа: кислые, цианистые, аммиачные, пирофосфатные, щелочные цинкатные. Кислые электролиты отличаются очень малой степенью наводороживания покрытий, поэтому рекомендуются для покрытия пружин, тонкостенных и термообработанных деталей.

При цинковании мелких деталей в барабанах происходит истирание части покрытия вследствие трения деталей друг с другом, поэтому время электролиза увеличивают на 15–20 % по

сравнению с расчетным. Наиболее эффективным способом цинкования мелких деталей является использование виброустановок, где детали перемещаются по контактирующей дорожке по спирали, многократно переворачиваясь.

Основное назначение кадмиевых покрытий – защита от коррозии деталей из высокопрочных и пружинных сталей, эксплуатирующихся при температуре до 200 °С в условиях воздействия морской воды. Кадмирование проводят в кислых цианистых и аммиакатных электролитах. Так как кадмий и его соединения токсичны, применение этого покрытия максимально ограничивают. Для замены кадмиевых покрытий разработаны покрытия сплавами цинк-кобальт и цинк-никель, которые обеспечивают надежную защиту от коррозии благодаря хорошему хромированию (цинк-никель) и защищают сталь электрохимически (цинк-кобальт). Аммиакатный электролит позволяет получать качественные покрытия сплавом цинк-никель на деталях простой конфигурации, используемые аноды – цинковые. Сплав цинк-кобальт не только улучшает коррозионную стойкость двигателя при высоких температурах, но и повышает прочность сцепления с резиной. Сплав цинк-кобальт можно получить из слабокислых электролитов с использованием импульсного режима электролиза.

Покрытие сплавом цинк-кобальт (20 %), получаемое из аммонийхлоридного электролита с добавками Лимеда НЦ и столярного клея, по коррозионной стойкости оценивается в 10 баллов (согласно ГОСТу 27597-88).

Защитно-декоративные покрытия. К защитно-декоративным покрытиям относят покрытия из никеля и хрома, которые будучи катодными по отношению к железу не обеспечивают электрохимической защиты от коррозии, как цинк и кадмий. Однако при отсутствии сквозных пор, что достигается либо нанесением покрытия толщиной 25–30 мкм, либо нанесением подслоя, катодные покрытия создают достаточно надежную защиту углеродистых сталей от коррозии.

Высокие декоративные свойства никелевых и хромовых покрытий широко используют в различных отраслях промышленности для получения блестящей и полублестящей поверхности, стойкой в различных климатических условиях, учитывая которые устанавливают необходимую толщину покрытия. В соответствии

с ГОСТ 9.303-84, определяющим общие требования к выбору покрытия, в табл. 5.2 представлены рекомендации по применению защитно-декоративных покрытий.

Таблица 5.2

Выбор толщины покрытий для защитно-декоративных целей

Вид покрытия	Условное обозначение	Толщина покрытий для различных условий, мкм			
		Л	С	Ж	ОЖ
Детали из углеродистой стали					
Никель	Н.	16	24	–	–
Медь-никель	М.Н.	9; 6	24; 9	30; 12	35; 15
Никель-хром	Н.Х.	15; 1	24; 1	–	–
Хром «молочный»	Х мол	12	35	45	60
Медь-никель-хром	М.Н.Х.	9;6;1	24; 9; 1	30;12;1	35; 15;1
Детали из меди и ее сплавов					
Никель блестящий	Н.б	9	12	15	18
Никель-хром	Н.Х.	6; 1	9;1	12; 1	15; 1

В качестве электролитов никелирования используются сульфатные с различными блескообразующими добавками, сульфатные, позволяющие получить покрытия с минимальными внутренними напряжениями, и ацетатно-хлоридные, дающие более твердые осадки с повышенной коррозионной стойкостью покрытий. В таблице 5.3 приведены основные электролиты никелирования и режимы осаждения покрытий.

Электролит № 1 рекомендуется для матового никелирования деталей в стационарных ваннах на подвесочных приспособлениях, а также в ваннах барабанного или колокольного типа. Электролит № 2 является низкоконцентрированным и характеризуется минимальным уносом никелевых солей с промывными водами. Электролит № 3 (Лимеда НБ-1) предназначен для покрытия деталей на подвесках. Электролит № 4 (Лимеда НБ-3) обеспечивает более высокую степень блеска. Перемешивание электролитов рекомендуется проводить сжатым воздухом при непрерывной

фильтрации.

Таблица 5.3

Основные электролиты никелирования
и режим осаждения покрытий

№ электр ролита	Компоненты электролита	Концен- трация, г/л	Режим электролиза			
			Катодная плотность тока, А/дм ²	Темпера- тура, °С	Вели- чина рН	Выход потоку, Вт, %
1	Никель серноокислый	140–200	0,5–2,0	20–55	5,2–5,8	90–95
	Никель хлористый	35–40				
	Борная кислота	25–40				
	Натрий серноокислый	60–80				
2	Никель серноокислый	70–75	0,5–1,0	18–25	5,6–5,8	95
	Борная кислота	25–30				
	Натрий серноокислый	40–50				
	Натрий хлористый	5–10				
3	Сульфат никеля	250–300	3–8	50–60	4,1–5,1	
	Хлорид никеля	50–60				
	Борная кислота	25–30				
	Бутиндиол 1,4	0,12–0,2				
	Сахарин	1,5–2,0				
	Фталемид	0,08–0,12				
НИА – 1, мл/л	0,5–2,0					
4	Никеля сульфат	250–300	2–8	50–60	3,5–6,0	95
	Никеля хлорид	40–90				
	Кислота борная	30–40				
	Бутиндиол 1,4	0,05–0,2				
	Сахарин	1,5–2,0				
	НИБ-3, мл/л	5–10				
	НИБ-12, мл/л	0,05–0,2				
	НИА-1, мл/л	0,5–0,2				

Электролит № 5 служит для получения блестящего покрытия сплавом никель-цинк (50 % цинка), который обеспечивает анодную защиту стальным изделиям. Для получения сплава используют отдельные никелевые и цинковые аноды с равной поверхностью. Ацетатно-хлоридный электролит № 6 позволяет получать беспористые покрытия при толщине более 6 мкм, характеризующиеся низкими внутренними напряжениями растяжения и высокой пластичностью. Для защитнодекоративного хромирования используют либо стандартный сернокислый электролит с различными добавками, либо тетрахроматный электролит № 3, который обладает наиболее высокой рассеивающей способностью и выходом по току хрома более 30 %. Процесс электролиза ведут при высоких плотностях тока с использованием нерастворимых свинцовых анодов.

Ацетатно-хлоридный электролит № 6 позволяет получать беспористые покрытия при толщине более 16 мкм, характеризующиеся низкими внутренними напряжениями растяжения и высокой пластичностью.

В последнее время широкое распространение в автомобильной промышленности получают многослойные покрытия: ***биникель, триникель, никель-никель-хром.***

Биникель – двухслойное никелевое покрытие, в котором первый слой – полублестящий с малой пористостью, второй – блестящий, содержащий серу. Второй слой вследствие повышенного содержания серы электроотрицателен по отношению к первому и в контакте с агрессивной средой электрохимически защищает его от коррозии.

Триникель представляет собой трехслойное покрытие полублестящего никеля, блестящего никеля с повышенным содержанием серы и наружный слой полублестящего или блестящего никеля. Трехслойные никелевые покрытия по своей коррозионной стойкости в 2–3 раза превосходят одно- и двухслойные. При этом коррозия в порах промежуточного слоя, служащего активным анодом в системе, распространяется горизонтально вдоль границы блестящего и полублестящего слоев (рис. 5.2 а, б). Средний слой осаждают из электролита никелирования № 7, в составе которого имеются две серосодержащие добавки, обеспечивающие включение в гальваноосадок стабильного (от 0,15 до

0,20 %) количества серы.

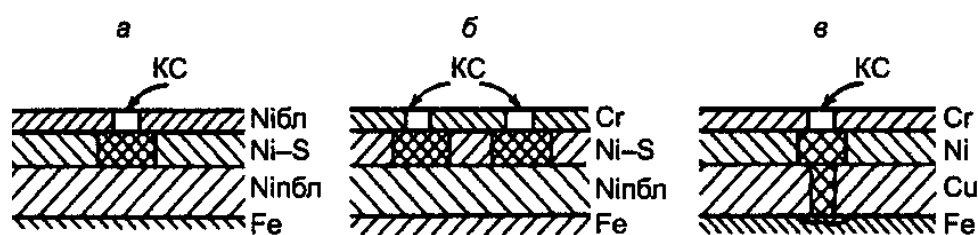


Рис. 5.2. Схема коррозии многослойных покрытий:

а – триникель; *б*– никель-полублестящий-никель

блестящий-хром; *в* – медь-никель-хром

Для повышения защитных свойств и декоративного вида многослойных покрытий ввиду потускнения никеля в промышленной атмосфере, содержащей оксид серы, на поверхность высокосернистого, или блестящего, слоя наносится микропористое хромовое покрытие толщиной 0,25–1 мкм. Вследствие множества пор в хромовом покрытии коррозия нижележащего слоя никеля как анода протекает равномерно по всей поверхности и, таким образом, проникновение ее вглубь замедляется (рис. 5.2, *б*). В качестве промежуточного слоя под хромовое покрытие на поверхность блестящего можно наносить никелевое покрытие (силникель) из электролита, содержащего дисперсные токонепроводящие частицы (каолин, корунд, оксид кремния). Из-за присутствия в промежуточном никелевом слое множества мелких токонепроводящих частиц хром осаждается на нем с микропористой структурой (10^6 – 10^8 пор на см^2), что снижает интенсивность коррозии никеля.

Широко используемое ранее многослойное покрытие медь (20–30 мкм), никель (10–20 мкм), хром (0,25–1 мкм) лучше защищает сталь от коррозии, чем однослойное никелевое или хромовое. Однако при наличии пор в покрытиях основной металл (сталь) может подвергаться коррозии и в этом случае (рис. 5.2, *в*). Для непосредственного нанесения медного покрытия на сталь можно использовать цианистый электролит меднения, позволяющий получать равномерные осадки с мелкокристаллической структурой даже на сложнопрофильных деталях. Состав электролита (г/л) и режим электролиза следующие: медь цианистая 20–30; натрий цианистый 5–15; температура 15–30 °С; плотность тока 0,3–0,5 А/дм².

К числу защитно-декоративных покрытий относятся также покрытия *черного никеля, черного хрома, агатового хрома, покрытия сплавами*. Сплав цинк-никель, содержащий 25–28 % никеля, является анодным по отношению к углеродистой стали и в то же время обладает такими же декоративными качествами, как и никель. Внедрение этого сплава вместо никеля дает большую экономию за счет снижения расхода дорогого никеля.

Сплав олово-никель, содержащий 30–40 % никеля, может заменять декоративное хромирование с подслоем никеля.

Сплав олово-медь с содержанием 40–45 % олова (белая бронза) по своим декоративным качествам не уступает серебряному покрытию.

Износостойкие покрытия. Для повышения твердости и износостойкости на поверхность деталей машин и приборов наносят износостойкие покрытия хромом, железом и никелем.

Твердость хромовых покрытий зависит от параметров электролиза – температуры электролита и плотности тока осаждения – и колеблется в пределах 3500–11000 МПа.

Наиболее твердые хромовые покрытия значительно превосходят по твердости закаленные (5000 МПа) и азотированные (7 500 МПа) стали.

Процесс хромирования сопровождается значительным выделением водорода, который частично проникает в стальную основу, ухудшая ее физико-механические свойства. Поэтому после хромирования необходимо проводить термообработку покрытия в области температур 250–300 °С, снижение твердости хромового покрытия при этом незначительно.

Толщина хрома при износостойком хромировании может находиться в пределах 9–60 мкм, а при восстановлении изношенных деталей достигает 500 мкм. Электролиты для твердого и защитно-декоративного хромирования имеют одинаковый состав – хромовый ангидрид и серную кислоту, в процессе нанесения покрытия используются нерастворимые аноды из сплава свинца с сурьмой (6–8 %) или оловом (6–8 %).

На основе твердого хромового покрытия можно получить покрытие с хорошими антифрикционными качествами: с низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. С этой целью наносится двухслойное хромовое покрытие: нижний плот-

ный и верхний пористый хром, способствующий проникновению и удержанию в нем масла. Пористый слой хрома получают анодным травлением в ванне хромирования слоя блестящего хрома, имеющего сетку тончайших трещин, анодное растворение протекает по границам трещин, вследствие чего они расширяются, образуя каналы.

Гальваническое железнение применяют обычно для восстановления размеров изношенных деталей, слой покрытия можно осаждать толщиной до 2–3 мм с использованием сульфатного или хлоридного электролита. Железное покрытие можно подвергать цементации и закалке для придания ему твердости закаленной стали.

Значительное повышение твердости и износостойкости никелевых покрытий достигается легированием их фосфором. Сплав никель-фосфор с содержанием 10–15 % фосфора, получаемый из сульфатного электролита с содержанием гипофосфита натрия может заменять хромовое покрытие на деталях сложной формы. На детали машин, работающих в условиях высоких трибологических нагрузок, поверх никель-фосфорного покрытия предлагается наносить органические фторполимерные покрытия. Хорошей износостойкостью обладают покрытия сплавами никель-вольфрам, никель-бор, которые по твердости не уступают хромовым покрытиям.

Композиционные электрохимические покрытия. Композиционные электрохимические покрытия (КЭП) являются двухфазными осадками, состоящими из металла-матрицы и частиц порошка, которые цементируются матрицей. Процесс нанесения КЭП выполняется при непрерывном перемешивании электролита-суспензии, и частицы второй фазы постоянно находятся во взвешенном состоянии, механически попадая на поверхность катода и зарастиваясь слоем металла. Размер дисперсных частиц, вводимых в электролиты, находится в пределах от 0,01 до 100 мкм. Чаще всего выбирают порошки со средним диаметром частиц 1–3 мкм, которые, находясь в металлической матрице, обеспечивают достаточное упрочнение и изотропность физико-механических свойств композиционного покрытия.

КЭП, образованные за счет включения оксидов, карбидов, нитридов, боридов, обладают повышенной твердостью и износо-

устойчивостью по сравнению с чистыми металлическими покрытиями, причем высокая твердость сохраняется во времени и после высокотемпературной обработки. В качестве второй фазы могут служить также и металлические порошки никеля, кобальта, железа, вольфрама, молибдена, ниобия и ванадия.

КЭП на основе никеля используются в качестве термостойких и износостойких (вторая фаза – SiC, Al₂O₃, Ta₂O₃, Cr₂O₃, TiC, WC, TiB₂, MoS₂ и др.), многослойных с повышенной коррозионной стойкостью, самосмазывающихся покрытий (вторая фаза - MoSi₂, графит). Никель-алмазные покрытия, обладающие абразивными свойствами, применяются для шлифовальных кругов и других инструментов. Особенно высокой твердостью и износостойкостью обладают КЭП состава Ni-P-Si и Ni-P-ZrO₂. В автомобильной промышленности с помощью композиционного покрытия химический никель-фторопласт решаются проблемы сухой смазки, например в замках дверей, в элементах конструкции коробки передач и сцепления. Облегченные цилиндры из Al-Si-сплава приобретают высокую износостойкость при нанесении на них химическим путем композиционных никелевых покрытий.

КЭП на основе хрома с частицами графита или смеси графита и карбида кремния используются для работы в условиях трения без смазки. Хромовые покрытия с ультрадисперсными алмазами отличаются высокой износостойкостью.

С помощью пульсирующего тока определенных параметров можно увеличить скорость осаждения КЭП на 20–25 % и улучшить распределение частиц второй фазы.

Неметаллические неорганические покрытия. Процесс фосфатирования заключается в образовании на поверхности металлических деталей пленок из фосфатов железа, марганца, цинка, которые могут быть пригодны для работы в трибосистемах. Коррозионную стойкость фосфатных покрытий можно заметно улучшить путем пропитки их в антикоррозионных маслах. Фосфатирование применяется перед нанесением лакокрасочных покрытий, для облегчения вальцовки, прокатки и других способов обработки металлов. Фосфатированию могут также подвергаться цинковые и кадмиевые покрытия, изделия из алюминия и его сплавов. Получаемые оксидно-фосфатные пленки являются хорошим грунтом под окраску. Фосфатирование стали проводят в растворе препара-

та «Мажеф», представляющего собой смесь монофосфата марганца и железа, при температурах 95–98 °С. Для фосфатирования алюминия и его сплавов применяют растворы на основе фосфорной кислоты и хромового ангидрида. Для особо жестких условий эксплуатации применяют цинковые и кадмиевые покрытия. Химическое оксидирование (или воронение) черных металлов проводят с целью получения защитно-декоративной пленки толщиной до 3 мкм с использованием химической обработки при высоких температурах в щелочных или кислых растворах. После операции оксидирования следует промасливание пленок или обработка в гидрофобизирующих жидкостях.

Пассивирование – процесс образования на поверхности металлов оксидно-хроматных пленок, обеспечивающих повышение коррозионной стойкости цинковых и кадмиевых покрытий.

Разработаны различные составы растворов (табл. 5.4) для хроматирования с получением бесцветных (раствор № 2), радужных (раствор № 1), голубых (раствор № 5), черных (раствор № 4) пленок. Пассивирование осуществляется химическим путем при комнатных температурах с продолжительностью от 15 с до нескольких минут.

Органические покрытия. Лакокрасочные покрытия как защитно-декоративные широко используются в автомобилестроении, машиностроении, вагоностроении, авиастроении. Достоинствами лакокрасочных покрытий являются сравнительная дешевизна, простота нанесения и сочетаемость с другими способами защиты металлов от коррозии.

Защитное действие лакокрасочных покрытий обусловлено механической изоляцией поверхности от внешней среды, высоким сопротивлением пленки к перемещению ионов, а также ингибирующим действием вводимых в органический растворитель пигментов. В качестве пигментов-ингибиторов наиболее эффективны свинцовый сурик, хромат цинка, цинковая и алюминиевая пудры. Обычно лакокрасочные покрытия являются многослойными (подслоем может служить фосфатная пленка), это уменьшает пористость и склонность покрытия к нитевидной коррозии. Недостатками лакокрасочных покрытий являются: невысокая механическая прочность; недостаточная стойкость в водной среде; экологическая опасность технологии лакирования. В связи с этим

разрабатываются лаки на водной основе и порошковые лаки, которые по защитной способности не уступают лакам на органической основе.

Таблица 5.4

Состав растворов и режимы пассивирования
цинковых и кадмиевых покрытий

№ раствора	Компоненты раствора	Концентрация, г/л	Режим обработки		
			Величина рН	Температура, °С	Продолжительность, с
1	Бихромат калия Кислота азотная Сульфат натрия	25–35 4–7 9–15	1,9–2,5	15–25	30–60
2	Кислота серная, мл/л Ликонда 21	0,9 30–60		15–30	20–40
3	Ликонда 22А Ликонда 22Б	2–4 0,1–0,2	2,0–2,5	15–35	10–60
4	Ликонда 31 Хромовый ангидрид Кислота уксусная, мл/л	50–60 38–42 70–80		15–25	4–6 мин

Обработка поверхности алюминия. Широкое использование сплавов алюминия в автомобилестроении невозможно без дополнительной поверхностной обработки, заключающейся в анодировании с последующей декоративной отделкой.

При анодной обработке алюминия на его поверхности создаются пористые и прочно сцепленные с основой оксидные пленки толщиной от 5 до 100 мкм в зависимости от режимов электролиза и состава электролита. Уплотненные оксидные или окрашенные пленки обладают высокой износостойкостью, электроизоляционными и декоративными свойствами и используются во всех отраслях техники.

Процесс анодирования проводят в растворах серной кислоты, в щавелевокислом электролите, в хроматных растворах.

Для алюминиевых кузовов, которые начали применяться из-

за небольшого веса, разработаны методы защиты от коррозии фосфатированием и лакированием, причем фосфатирование облегчает одновременно и обработку давлением. В Германии разработан метод нанесения на поверхность алюминия алмазоподобных покрытий напылением ионизированного углерода в вакууме.

Электролитическое полирование. Электролитическое полирование применяют для повышения коррозионной стойкости и улучшения декоративного вида путем придания блеска и сглаживания микронеровностей изделиям из коррозионно-стойкой, хромистой и углеродистой сталей, меди и латуни, бронзы, сплавов алюминия. Процесс заключается в анодной обработке металла в условиях выделения кислорода и одновременного травления в кислых растворах, содержащих хромовый ангидрид и другие добавки. Для полирования коррозионно-стойких сталей используют электролит следующего состава (г/л): фосфорная кислота – 50 г; серная кислота – 50 г; хромовый ангидрид – 40 г. Процесс ведут при температуре 40–60 °С, анодной плотности тока 10–45 А/дм² в течение 10 мин.

Обработка поверхности цинковых сплавов. С целью защиты от коррозии и придания декоративного вида на изделия из цинковых сплавов наносят защитные покрытия – краски, эмали, металлические покрытия, среди которых наибольшее распространение получает процесс никелирования. Непосредственное никелирование сплавов цинка требует введения в электролиты никелирования специальных органических и неорганических добавок, толчка тока, повышенной температуры. Более надежные результаты получаются либо при использовании подслоя меди, осажденного из пиррофосфатного или цианистого электролита, с последующим никелированием, либо при использовании химического способа нанесения никеля.

Свинцевание и оловянирование. Свинцовые покрытия, наносимые на изделия из черных сплавов при условии их беспористости, применяют для защиты изделий от коррозии в загрязненной промышленной атмосфере, в растворах серной кислоты, в сернистых соединениях. Толщина свинцовых покрытий может достигать 300 мкм и более.

Для свинцевания используют кислые электролиты на основе

растворимых солей свинца борфтористоводородной, кремнефтористоводородной и фенолсульфоновых кислот. Для повышения прочности сцепления покрытия толщиной более 100 мкм предварительно рекомендуется проводить пескоструйную или гидроабразивную обработку металла основы.

Помимо защиты от коррозии изделий пищевой промышленности и обеспечения пайки, оловянные покрытия используют для защиты от азотирования, гуммирования. Оловянное покрытие является катодным по отношению к стали и анодным по отношению к медным сплавам. Для повышения твердости и износоустойчивости покрытия олово легируют никелем, кобальтом или висмутом. Для оловянирования применяют электролиты двух видов: кислые и щелочные, отличающиеся высокой рассеивающей способностью. Кислый сульфатный электролит применяется для получения гладких матовых покрытий на подвесках и в барабанах.

[Вернуться в оглавление](#)

5.2. Технология нанесения гальванических покрытий

Для обеспечения эксплуатационных характеристик деталей машин используются различные методы нанесения защитных покрытий: гальванические, диффузионные, погружением в расплав, вакуумные, напыления с использованием плазменной техники.

Гальванотехника в современном производстве занимает особое место, так как электрохимическими методами достигается не только традиционная защита от коррозии, но и обеспечение важнейших функциональных свойств поверхности изделий.

Технологический процесс нанесения гальванического покрытия представляет собой целый комплекс, основными операциями которого являются подготовка поверхности покрываемого изделия, нанесение гальванического покрытия, обработка гальванического покрытия.

Подготовка поверхности деталей. Для получения качественных гальванических осадков поверхность металлических деталей должна быть соответствующим образом подготовлена. Подготовка поверхности состоит в удалении с нее жиров и органических загрязнений, окалина, оксидов, заусенцев, облоя, рисок и других поверхностных дефектов. Прочность сцепления покрытий значи-

тельно зависит от шероховатости поверхности. Чем ниже шероховатость поверхности основного металла, тем качественнее наносимые покрытия: меньше пористость и выше защитные свойства. В зависимости от назначения покрытия подготовку поверхности основного металла проводят по-разному. Перед нанесением защитных покрытий (цинковых, кадмиевых) подготовка поверхности сводится в основном к обезжириванию и травлению. Перед нанесением защитно-декоративных покрытий (никелевых, хромовых) требуется еще механическая обработка для получения гладкой поверхности, так как в процессе нанесения указанных покрытий дефекты поверхности могут стать более рельефными, поскольку плотность тока и толщина на выступах больше, чем в углублениях.

К механическим способам подготовки поверхности относятся струйно-абразивная обработка, галтовка, виброабразивная обработка, шлифование и полирование.

Струйно-абразивная обработка обеспечивает получение однородной матовой поверхности с удалением окалина, ржавчины, забоин, царапин и может выполняться несколькими способами. При гидроабразивной обработке на поверхность обрабатываемых изделий под давлением 0,1–0,6 МПа подается абразивно-водная пульпа, в состав которой входят кварцевый или металлический песок, шлифовальные порошки и вода в соотношении 1:4. Для предотвращения коррозии стальных деталей в состав вводят 15–20 г/л нитрита натрия и 4–5 г/л кальцинированной соды. Размер частиц абразивного материала выбирается в зависимости от характера изделий, материала обрабатываемого металла и природы удаляемых оксидов.

Галтовка заключается в обработке мелких деталей во вращающихся металлических барабанах. Окалина, ржавчина, заусенцы и другие дефекты поверхности удаляются с деталей в результате взаимного трения последних в среде наполнителей. При сухой галтовке детали вместе с песком загружают на 1/3 или на 2/3 объема барабана. При мокрой галтовке применяют раствор кальцинированной соды или тринатрийфосфата (20 г/л) и ПАВ. Частота вращения барабанов составляет 10–15 об/мин для крупных деталей и 40–60 об/мин для мелких; продолжительность обработки зависит от состояния поверхности и находится в преде-

лах 2–50 ч.

Виброабразивная обработка деталей приводит к сглаживанию их поверхности в результате колебательных движений деталей в специальных контейнерах, куда также загружается наполнитель из абразивных материалов (бой шлифовальных кругов, шлифовальные порошки и др.). Контейнер совершает колебательные движения с частотой 1500–3000 колебаний в минуту с амплитудой до 5 мм в течение 2–5 ч.

Шлифование применяют для удаления царапин, забоин и других дефектов с целью получения гладкой поверхности и проводят в несколько переходов с постепенным уменьшением размера зерна абразивного материала. В качестве обрабатывающего инструмента служит эластичный круг, изготовленный из войлока, фетра, сукна, кожи, хлопчатобумажных материалов, на которые клеятся зерна абразивного материала. При подводном шлифовании детали и абразивные материалы загружают в перфорированные барабаны, которые вращаются со скоростью 20–60 об/мин в жидкой среде.

Полирование является заключительной операцией декоративной отделки, в результате которой параметр шероховатости поверхности снижается до 0,4–0,2 мкм. Полирование осуществляется с помощью кругов из фетра, войлока, бязи, которые периодически смазываются полировальными пастами. В состав полировальных паст вводятся мелкие микропорошки и абразивные материалы (оксид хрома, оксид алюминия, венская известь). Широкое распространение получают водорастворимые пасты, содержащие дополнительно мыло и глицерин, что облегчает удаление следов пасты с поверхности металла без применения растворителей. Для черных металлов и хромистых сталей паста имеет следующий состав (массовая доля, %): оксид хрома – 30; микропорошок М5, М10 – 30; хозяйственное мыло шестидесятипроцентное – 16; глицерин – 5; смазка УН – 3; препарат ДТ-7 – 1; мочевины – 1; вода – 14. Для цветных металлов и сплавов используется водорастворимая паста.

Химическая подготовка поверхности заключается в обезжиривании поверхности деталей и может выполняться различными способами: в органических растворителях, в щелочных растворах и электрохимически.

Обезжиривание растворителями (трихлорэтилен, хлористый метизен, хладон-113 и др.) является эффективным средством очистки деталей от полировочных паст и консистентных смазок. Однако их применение ограничено большой пожарной опасностью одних растворителей и высокой токсичностью других.

Химическое обезжиривание в щелочных растворах или в моющих препаратах применяется с целью удаления жировых загрязнений с поверхности металла. Щелочные компоненты оказывают омыляющее действие, переводя растительные и животные жиры в растворимую форму.

Электрохимическое обезжиривание является наиболее эффективным методом очистки поверхности деталей, так как выделяющиеся на деталях пузырьки водорода (катодное обезжиривание) или кислорода (анодное обезжиривание) способствуют отрыву жировых частиц от поверхности. Электрохимическое обезжиривание проводится после предварительного химического обезжиривания или обезжиривания растворителями. Катодное обезжиривание более эффективно, так как при одном и том же количестве прошедшего электричества водорода выделяется в 2 раза больше по объему, чем кислорода. Кроме того, в катодной зоне происходит подщелачивание раствора, что способствует лучшему омылению жировых загрязнений, тогда как в анодной зоне содержание щелочи снижается. Недостатком катодной обработки является наводороживание металла, для уменьшения которого в состав раствора рекомендуется вводить ПАВ. Детали из сплавов меди рекомендуется обезжиривать только на катоде, так как при анодной обработке они окисляются. При обработке деталей в барабанах из пластика (винипласт, полиэтилен) температуру растворов снижают до 40–50 °С, а продолжительность обработки увеличивают до 10–15 мин.

В последние годы все большее применение в обезжиривающих растворах находят добавки ПАВ, которые позволяют уменьшить концентрацию других компонентов и одновременно повысить скорость очистки деталей от загрязнений. Эффективность их действия возрастает, если раствор содержит щелочные соли или несколько ПАВ. Введение некоторых ПАВ (моющее средство «Элона», ДХТИ-НТ) позволяет снижать температуру обезжиривания до комнатной.

Травление. Для удаления с поверхности деталей оксидов проводят химическое или электрохимическое травление в кислых растворах для изделий из черных металлов и в щелочных растворах – для сплавов алюминия.

Процесс травления сопровождается растворением части металла и наводороживанием, которое можно уменьшить, вводя в растворы вещества-ингибиторы, такие как ПБ-5, КПП, катапин, уротропин и др.

Электрохимическое анодное травление применяют в том случае, когда опасно наводороживание, оно проводится в разбавленных серноокислых или солянокислых растворах при плотности тока 3–7 А/дм² и температуре 18–40 °С. Составы растворов анодного травления подбираются в соответствии с маркой стали.

Детали из высоколегированных и коррозионностойких сталей обрабатываются в несколько стадий: разрыхление окалины, кислотное травление и осветление. Кислотное травление проводят в смеси кислот: кислота серная – 350–400 г/л; кислота азотная – 70–90 г/л; кислота соляная – 70–90 г/л при температуре 40–50 °С в течение 3–10 минут. Осветление – удаление шлама в виде темного налета производят в растворе азотной кислоты – 350–400 г/л с добавлением фтористоводородной кислоты – 4–5 г/л.

Для одновременного травления и обезжиривания предложено несколько составов растворов, наиболее эффективен раствор состава (г/л): фосфорная кислота – 150; соляная кислота – 150; уротропин – 30–40.

Активация деталей проводится непосредственно перед их погружением в гальваническую ванну с целью удаления тончайших оксидных пленок. Обработку деталей проводят в разбавленных растворах кислот в течение 15–60 с.

[Вернуться в оглавление](#)

5.3. Нанесение гальванических покрытий

При электрохимическом способе получения металлических покрытий (электролизе) покрываемые изделия являются катодом, на котором протекает процесс осаждения требуемого металлического осадка, в большинстве случаев из водных электролитов. Используемые аноды могут быть растворимыми и нераствори-

мыми, на которых либо выделяется газообразный кислород, либо протекают необходимые процессы формирования пленок.

Достоинствами электрохимического метода являются получение покрытий строго определенного состава, свойств и толщины, возможность механизации и автоматизации процесса. Однако процесс электролиза требует применения внешнего источника питания и дополнительного оборудования и химикатов для регенерации отработанных электролитов и очистки промывных сточных вод. Кроме основных операций, в технологический процесс нанесения гальванических покрытий входят вспомогательные операции промывки и сушки.

Промывку осуществляют между отдельными подготовительными операциями (обезжиривание, травление, активация) для предотвращения переноса компонентов раствора с деталями и подвесками из одной ванны в другую. Детали промывают после нанесения покрытия и заключительных операций для удаления с них и подвесок остатков электролита. Промывка осуществляется либо в одиночных одноступенчатых ваннах, либо в многоступенчатых каскадных. Расход воды на промывку определяется согласно ГОСТу 9.047-75 и зависит от удельного выноса раствора из ванн поверхностью деталей, площади промываемой поверхности, числа ступеней промывки и критерия промывки. Критерий промывки показывает, во сколько раз следует снизить концентрацию раствора, выносимого поверхностью деталей, до значений, предельно допустимых в ванне промывки. Если перед промывкой устанавливают ванны-сборники электролита, то значение критерия промывки уменьшают умножением на коэффициенты: 0,4 – при одной ванне улавливания; 0,15 – при двух; 0,06 – при трех ваннах улавливания. При струйном методе промывки, который рекомендуется использовать для деталей простой формы, расход воды снижается на 30 % по сравнению с одиночной ванной промывки. Для промывочных операций применяют водопроводную воду питьевого качества. Перед сушкой для прогрева деталей используется горячая вода (70–90 °С), теплая вода (40–50 °С) применяется после обезжиривания, хроматирования, травления легких сплавов, анодного оксидирования.

После окончательной промывки теплой или горячей водой детали сушат. Быстрая и качественная сушка препятствует воз-

никновению на поверхности покрытия пятен и полос.

[Вернуться в оглавление](#)

5.4. Оборудование для нанесения гальванических покрытий

Для механической подготовки поверхности деталей наибольшее распространение получили шлифовально-полировальные двухшпиндельные и ленточные станки. Станки приспособлены как для обработки деталей на шлифовальном или полировальном круге, так и на абразивной ленте. Для абразивной обработки поверхности деталей применяют также галтовочные барабаны, установки подводного полирования, установки для виброабразивной и гидроабразивной обработок. Основные характеристики установок приведены в специальной литературе.

Для обезжиривания в щелочных растворах могут быть использованы моечно-сушильные установки типа УПН-М с возможностью выбора программы обработки, установки струйной обработки типа МСА, в которых детали перемещаются по конвейеру и орошаются щелочным раствором. Наибольшее распространение получили стационарные ванны и ванны автоматических линий. Ванны выполняются из стали, оборудованы подогревом и вытяжными вентиляционными устройствами.

Ванны для травления в кислотах изготавливают из кислотоустойчивых материалов (винипласт, полипропилен) или из коррозионно-стойкой стали марки 12Х18Н9Т. Ванны должны оборудоваться вытяжными устройствами и крышками с гидравлическим затвором.

Ванны для промывки деталей могут быть многосекционными для осуществления каскадной промывки.

Ванны, используемые для гальванических операций, выпускаются стационарного типа, конструкция и типоразмеры которых соответствуют ОСТу 2 П65-1-80. В зависимости от назначения стальные ванны футеруются и оборудуются нагревателями, устройствами для перемешивания и вентиляции. Ванны автоматических линий также имеют стандартные размеры и оборудованы всеми средствами, необходимыми для выполнения технологических операций.

Для нанесения гальванических покрытий на мелкие детали

используют ванны колокольного или барабанного типа. Колокольные ванны погружного типа снабжены выпрямителем тока и корзиной для сбора обработанных деталей.

Барабаны, представляющие собой шести- или восьмигранную призму, куда загружаются мелкие детали, вращаются в ванне в процессе гальванической обработки.

Для увеличения производительности труда, снижения трудоемкости и повышения качества наносимого покрытия гальванические операции и стадии подготовки и промывки поверхности автоматизируют. По конструктивным особенностям автоматические линии делятся на автооператорные и на линии с жестким циклом.

В автооператорных линиях (АОЛ) можно осуществлять различные технологические процессы или несколько процессов одновременно, изменять толщину наносимых покрытий, вести обработку изделий на подвесках, в барабанах, корзинах. АОЛ включает в себя ванны, автооператоры (манипуляторы), сушильную камеру, загрузочно-разгрузочные стойки, систему вентиляции, металлоконструкцию, систему трубопроводов, площадку обслуживания, командоаппарат и вспомогательное оборудование. Во вспомогательное оборудование могут входить емкости для приготовления электролитов, запасные емкости, фильтровальные установки, насосы, теплообменники. Перенос обрабатываемых изделий по линии и длительность их пребывания на каждой операции задаются технологическим процессом, работа и движение автооператора осуществляется по разработанной циклограмме. В зависимости от требуемой производительности в линии может быть несколько автооператоров. АОЛ считаются гибкими производственными модулями, так как способны к перестройке технологических процессов без конструктивных изменений унифицированных узлов, из которых они komponуются.

АОЛ, исходя из конструкции, формы автооператоров и их размещения, подразделяются на линии с подвесными, консольными и порталными автооператорами (АО).

Подвесные АО, грузоподъемность которых достигает 2000 кг, перемещаются по направляющим путям над ваннами, которые обычно крепятся к перекрытиям цеха. Линии с подвесными АО легко обслуживаются и могут иметь различные габаритные размеры.

Портальные АО применяют в линиях, расположенных в низких производственных помещениях, перемещаются АО по направляющим путям, чаще всего монтируемым непосредственно к корпусам ванн. Ванны в таких линиях труднее обслуживать и ремонтировать.

Линии с консольными АО отличаются компактностью, могут свободно обслуживаться только с одной стороны, грузоподъемность АО достигает 200 кг. Консольные АО перемещаются по направляющим путям, установленным на металлоконструкции сбоку ванн.

К гальваническим покрытиям, применяемым в различных областях техники, предъявляется ряд требований по их физико-механическим свойствам. ГОСТ 9.302-88 предусматривает определение толщины, пористости, прочности сцепления, защитных свойств неметаллических неорганических покрытий.

Защитные свойства металлических и неметаллических неорганических покрытий контролируются по ГОСТу 9.308-85, в котором используются методы ускоренных коррозионных испытаний с применением камер тепла, влаги, холода, давления и различных сред.

[Вернуться в оглавление](#)

5.5. Контроль качества гальванических покрытий

Для оценки качества покрытий применяются различные методы контроля. Подробно методы и технологии неразрушающего контроля поверхностей и покрытий изложены во второй части настоящего учебного пособия. Далее приведен краткий обзор методов контроля наиболее часто применяемый в цеховых условиях

Микротвердость покрытий определяется по ГОСТу 9450-76. При внешнем осмотре деталей с покрытием можно выявить такие дефекты покрытий, как питтинг, «подгары» и «вытяжки» (темные пятна и полосы на покрытии), неоднородность цвета и блеска, шероховатости. Перечисленные дефекты поверхности более отчетливо видны, если создать рассеянное освещение.

Измерение толщины покрытий. Во многих случаях решающим признаком качества покрытия является его толщина. При

контроле толщины покрытия следует учитывать, что даже на деталях простой конфигурации толщина слоя металла неодинакова в различных точках; еще больший разброс в толщине слоя существует на профилированных изделиях. Поэтому в ряде случаев необходимо измерять не только среднюю толщину покрытия, но и минимальную на определенных участках изделия. Для определения толщины гальванических покрытий используются как разрушающие, так и неразрушающие методы.

Методы контроля толщины покрытия с *разрушением изделия* делятся на химические, вызывающие разрушение только покрытия, и физические, при использовании которых нарушается целостность самого изделия.

Самым простым *неразрушающим методом* для определения средней толщины покрытия на деталях массой не более 200 г является гравиметрический метод. Он основан на определении массы покрытия путем взвешивания деталей на аналитических весах до и после получения покрытия.

Наибольшее распространение в промышленности среди разрушающих методов получил *капельный метод*, что обусловлено его универсальностью и простотой выполнения операций измерения. Метод основан на растворении покрытия каплями раствора, наносимыми на поверхность детали и выдерживаемыми в течение определенного промежутка времени.

Проверка толщины покрытия капельным методом сводится к следующему. На поверхность покрытия из капельницы с внутренним диаметром кончика капилляра 1,5–2,0 мм наносят каплю раствора и выдерживают ее заданное время. Затем каплю удаляют фильтровальной бумагой и на ее место наносят вторую каплю раствора. Эту операцию проводят до тех пор, пока на этом месте появится основной металл или подслои. Относительная погрешность капельного метода составляет $\pm 30\%$, что снижает его информативность.

Электроструйный метод основан на растворении покрытия раствором, вытекающим на поверхность детали в виде струи с определенной скоростью. Толщину покрытия рассчитывают по времени, затраченному на растворение покрытия. Данный метод применим для быстрого и точного измерения местной толщины одно- и многослойных покрытий.

Кулонометрический метод основан на локальном анодном растворении постоянным током ограниченного участка гальванопокрытия с калиброванной поверхностью. Этим методом можно определять толщину от 0,1 до 100 мкм однослойных и многослойных покрытий на металлической и неметаллической поверхности деталей.

К группе физических разрушающих методов относятся металлографический, метод хорды и спектральный.

Металлографический метод основан на определении толщины покрытия на поперечном шлифе и применим для измерения толщины одно- и многослойных покрытий. Микрошлиф вырезается из детали так, чтобы плоскость покрытия была перпендикулярна к плоскости шлифа. Ширина покрытия измеряется с помощью микроскопа при 500–1000-кратном увеличении для покрытия толщиной до 20 мкм и 100–200-кратном для покрытия толщиной более 20 мкм.

Метод хорды и спектральный сложны по исполнению и дают относительно большие погрешности, поэтому не находят большого практического использования.

Среди неразрушающих способов наибольшее распространение находят магнитный и электромагнитный методы, которые позволяют определять толщину немагнитного покрытия на стали, чугуне, никеле, а также толщину магнитного покрытия на немагнитном материале. Методом вихревых токов можно измерять толщину неэлектропроводных покрытий, полученных на деталях из неферромагнитного материала.

Термоэлектрический метод основан на регистрации разности напряжений, возникающих под действием теплоты между основным металлом и металлическим покрытием, вызванной различием их масс и теплопроводностей и зависящей от толщины покрытия. Метод применим для измерения толщины никелевых покрытий 5–40 мкм на деталях из стали, меди, цинка, а также из их сплавов. Погрешность метода $\pm 15\%$.

Метод ионизирующего излучения основан на измерении интенсивности обратного рассеяния гамма-излучения в зависимости от толщины покрытия или регистрации и анализа возбужденного при помощи радиоизотопного источника спектра рентгеновского излучения материала покрытия и основного металла. В случае

измерения толщины металлопокрытия разница атомных номеров основного металла и покрытия должна быть более двух единиц. Относительная погрешность этого метода $\pm 10\%$.

[Вернуться в оглавление](#)

5.6. Контрольные вопросы

1. Какие свойства определяют назначение покрытий?
2. Что такое пассивирование?
3. Что такое биникель?
4. Что является достоинствами электрохимического метода?
5. Какие станки получили наибольшее распространение для механической подготовки поверхности деталей?
6. Как определяется микротвердость покрытий?
7. Какими методами определяется толщина покрытий?
8. Какие методы относятся к группе физических разрушающих методов?

[Вернуться в оглавление](#)

ГЛАВА 6. УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В последнее время все более широкое применение находят технологические процессы, основанные на использовании энергии лазерного луча. К ним относятся лазерное термоупрочнение, легирование, резка, сварка и др. Эти технологии позволяют по-новому решать задачи по повышению эксплуатационных характеристик поверхностных слоев изделий, уровня автоматизации производства и производительности труда, снижению энерго- и металлоемкости, расхода дефицитных материалов.

К основным особенностям этих технологий относятся: высокая концентрация энергии, вводимой в зону воздействия; локальность и прецизионность обработки при существенно меньших суммарных энергозатратах.

Практическое отсутствие инструмента в этих технологиях, а следовательно, и его износа, а также механического контакта с обрабатываемой деталью обеспечивает мобильность в управлении, возможность широкого регулирования режимов обработки в сочетании с простотой позиционирования деталей.

[Вернуться в оглавление](#)

6.1. Общие понятия

Лазер – аббревиатура английского названия Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – «усиление света с помощью индуцированного излучения».

Лазер – оптический квантовый генератор (ОКГ) электромагнитного излучения. Идея лазера складывается из следующих элементов:

- наряду со спонтанным излучением существует вынужденное. Этот вид излучения возникает тогда, когда фотон света встречается с возбужденным атомом. Если энергия возбужденного атома в точности равна энергии фотона, то фотон заставляет атом высветиться. Атом переходит на более низкий энергетический уровень и излучает фотон. Особенностью стимулированного излучения является то, что данный фотон будет таким же, как тот, который его вызвал, не только в отношении энергии,

но и равным по фазе и будет двигаться в том же направлении;

- если систему излучающих атомов заключить в трубку, донышки которой находятся на определенном расстоянии друг от друга и служат зеркалами для фотонов, то можно за счет движения фотонов туда и обратно постепенно собрать в этом сосуде множество фотонов, порожденных одинаково возбужденными атомами;

- необходимо подольше удержать атомы в возбужденном состоянии, а затем после такой «накачки» заставить все атомы высветиться одновременно.

Осуществление идеи лазера, т.е. размножение одного фотона и получение миллиардов тождественных не отличимых по своим свойствам фотонов, должно привести к созданию луча огромной интенсивности. Такой пучок размывается в ничтожной степени, и на поперечное сечение луча приходится огромная энергия.

В лазерах всех типов излучение генерирует активная среда с избытком частиц (атомов, молекул и др.) на верхнем возбужденном энергетическом уровне E_2 по сравнению с числом частиц на нижнем уровне рабочего перехода E_1 (так называемая среда с инверсной заселенностью уровней). Излучаемые частицами при вынужденных (индуцированных) переходах $E_2 \rightarrow E_1$ волны по частоте и направлению распространения, поляризации по фазе тождественны падающей волне, и, следовательно, эти волны когерентны друг другу независимо от способа возбуждения атомов активной среды. Лазеры различаются:

- способом создания в среде инверсионной заселенности, или способом «накачки» (оптическим излучением, электронным пучком, химической реакцией);

- лазерным веществом (газы, жидкости, твердые диэлектрики);

- конструкцией резонатора (плоский, кольцевой и др.);

- режимом работы (импульсный, непрерывный).

Лазеры характеризуются мощностью, КПД преобразования какого-либо вида энергии в энергию излучения, энергией в импульсе и другими параметрами.

В лазерах в качестве элемента обратной связи используется система зеркал, называемая резонатором. В простейшем и наиболее

лее часто встречающихся случаях резонатор – это две обращенные друг к другу отражающие поверхности, между ними располагается активное вещество, в котором возникает процесс излучения.

Разновидности некоторых резонаторов показаны на рис. 6.1.

Основное назначение резонатора – создать условия, при которых возникающее внутри него (в рабочем веществе) индуцированное излучение многократно проходит через активную среду, усиливаясь тем самым, и выходит за пределы зеркал уже в виде интенсивного излучения.

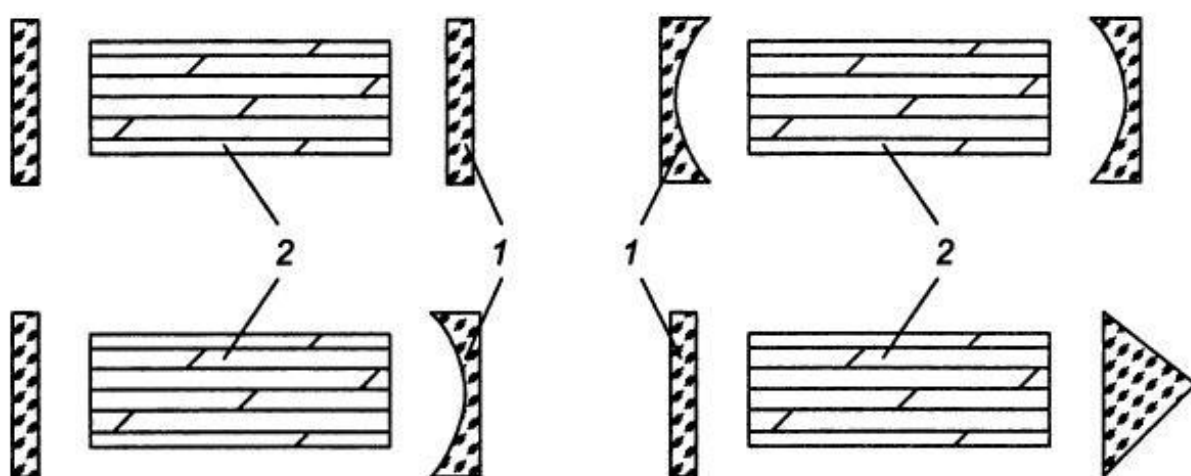


Рис. 6.1. Разновидности лазерных резонаторов:
1– зеркало; 2– рабочее вещество

Технологические процессы, в основу которых положен локальный нагрев обрабатываемого материала излучением лазера, занимают все более прочное место в промышленности. Лазеры представляют собой источник необычного света. Энергия световых волн, которые излучают лазеры, концентрируется в пространстве в виде узкого луча. Луч лазера – это излучение световых волн только одной длины, или строго монохроматическое излучение.

Таким образом, лазерное излучение обладает рядом особых свойств: большой интенсивностью потока электромагнитной энергии, высокой монохроматичностью; значительной степенью временной и пространственной когерентности и вследствие этого чрезвычайно узкой направленностью своего распространения. Диапазон излучаемых волн – 0,1–70 мкм (от ультрафиолетовой

до инфракрасной области спектра).

Лазерное излучение имеет достаточно узкий спектральный интервал (в пределах одной волны), т.е. высокую монохроматичность. Монохроматичность связана с его когерентностью (пространственной и временной).

Пространственная когерентность обуславливает высокую направленность и возможность фокусирования на малых площадках. Основную роль в тепловых процессах играют энергетические параметры: энергия, мощность, плотность энергии, длительность импульса, пространственная и временная структура излучения, пространственное распределение плотности мощности, условия фокусировки, физические свойства материала (отражательная способность, температура плавления и др.).

Мощность излучения импульсных лазеров может изменяться от сотен киловатт (свободная генерация) до гигаватт (модулированная добротность).

Интенсивность и когерентность лазерного излучения революционизировали многие области техники. Производство лазеров за последние десятилетия превратилось в важнейшую отрасль промышленности. Лазеры находят применение как генераторы излучения, передающие не только энергию, но и информацию. Ведется исследование возможностей применения лазеров для создания термоядерной реакции. Лазер применяется в качестве ножа, инструмента для проведения тончайших операций, как средство разделения материала.

В машиностроении он применяется для следующих процессов:

- локальной термообработки поверхности деталей;
- сварки;
- плавления и испарения материала;
- резания различных материалов (особенно жаропрочных, пластмасс);
- легирования поверхности;
- получения отверстий малых диаметров; мелких пазов, ризок и т.д. (в том числе в труднообрабатываемых материалах);
- контроля качества изделий.

[Вернуться в оглавление](#)

6.2. Технологические лазерные установки для упрочнения деталей

Для упрочнения деталей применяются лазерные установки непрерывного, импульсного и импульсно-периодического действия с твердотельным или газовым активным элементом.

Твердотельные лазеры делятся на лазеры видимого и ближнего инфракрасного диапазона длин волн излучения, работающие в основном в импульсном и импульснопериодическом режимах. Газовые лазеры промышленного назначения классифицируются следующим образом: быстропоточные газоразрядные технологические лазеры (ТЛ) – CO_2 -лазеры с самостоятельным и несамостоятельным разрядом; газоразрядные ТЛ с диффузионным охлаждением; газоразрядные импульсно-периодического действия; газодинамические.

В установках, работающих в импульсном и импульсно-периодическом режимах, в качестве активной среды используются стержни из рубина, алюмоиттриевого граната и стекла, активированного ионами неодима, иттербия, эрбия, гольмия и других элементов.

Характеристики твердотельных лазерных установок представлены в табл. 6.1.

КПД твердотельных лазеров не превышает 3%.

Для упрочнения материалов предназначены лишь «Квант-16» и «Квант-18». «Квант-16» имеет невысокую производительность (до $100 \text{ мм}^2/\text{мин}$), неравномерное распределение энергии в сечении луча; у «Кванта-18» более высокая производительность – $500\text{--}900 \text{ мм}^2/\text{мин}$.

Из газовых лазеров наибольшее распространение получили быстропоточные газоразрядные CO_2 -лазеры с выходной мощностью от 1 до 10 кВт и расходимостью луча 1–2 мрад. Наиболее разработаны быстропоточные лазеры с самостоятельным разрядом постоянного тока, а также с несамостоятельным разрядом, контролируемым электронным пучком (электроионизационные лазеры). При выходной мощности 1–5 кВт используется разряд первого типа, так как при относительной технологической простоте он устойчив при небольших (4–8 кПа) давлениях смеси. Повышение мощности вызывает значительное увеличение габ-

ритов установки. Разряд второго типа устойчив при давлении до 0,1 МПа. На его основе можно получить лазеры с выходной мощностью до 10 кВт.

Таблица 6.1

Характеристики твердотельных лазерных установок

Установка	Энергия излучения, Дж	Длительность импульса, мс	Частота повторения импульсов, Гц	Диаметр светового пятна, мм	Масса, кг	Потребляемая мощность, кВт
«Квант-9М»	8	0,5	2	До 2	200	2,5
«Квант-12»	3	1,5; 4	20	0,25; 1	600	6
«Квант-10»	15	4		0,4–1,4	350	6
«Квант-16»	30	4-7	0,1–1	2-5	350	–
«Квант-17»	8	4	10	–	550	12
Двухлучевой «Квант-18»	10–130	8–10	1			5

Фирма «SpectraPhysics» (США) выпускает электроионизационные лазеры с самостоятельным разрядом мощностью 1,2; 2,5; и 5 кВт, фирма UTRS – лазеры мощностью от 0,5 до 18 кВт. В установках применены двух-, четырех- или восьми-трубные ОКГ замкнутого цикла с конвективным охлаждением.

Выпускаемый в России CO₂-лазер – быстропроточный электроразрядный, с замкнутым газодинамическим контуром и поперечной прокачкой. В качестве рабочего вещества используют смесь CO₂, N₂ и He, взятых в соотношении 1:20:20. Расход газовой смеси – 2,6–3 м³/ч. На этой установке достигается мощность длительного непрерывного излучения 5 кВт.

Другой распространенный тип технологических CO₂-лазеров – с диффузионным охлаждением. Предельная мощность однолучевого ТЛ этого типа – около 1 кВт. В отличие от быстропроточных, в диффузионных ТЛ осуществляется прокачка жидкого хладагента для охлаждения трубок, но нет необходимости в

быстрой прокачке больших объемов газа, что делает установку более компактной. Разработаны два типа многолучевых ТЛ большой мощности: лазер «Иглан», питаемый разрядом постоянного тока, и лазер МКТЛ-2 мощностью 1–2 кВт с разрядом переменного тока, имеющего частоту 10–20 кГц.

Непрерывный CO₂-лазер «Иглан-3» представляет собой систему из 37 компактно уложенных независимых трубчатых лазеров длиной 4,6 м общей мощностью 2,5 кВт. Каждый лазер имеет свое питание, но у них один общий резонатор, общая газовая система и единая система охлаждения. Множество параллельных лучей фокусируется линзой большого диаметра. Установка оснащена системой измерения мощности излучения, для точной фокусировки луча в качестве имитатора применен He + Ne-лазер.

Одна из первых лазерных технологических установок ЛГН-702 («Кардамон») – непрерывный CO₂-лазер с мощностью излучения 800 Вт. Излучатель имеет свернутый резонатор, пакетированная конструкция его активной части состоит из четырех параллельно расположенных газозарядных секций. Оптическая связь осуществляется с помощью трех пар поворотных и двух концевых зеркал.

У импульсно-периодических установок частота повторения импульсов порядка 10^2 – 10^3 с⁻¹, средняя мощность от 0,1 до 10 кВт, пиковая мощность составляет 10– 10^3 кВт, длительность излучения 10^{-5} – 10^{-3} с. Большая длительность импульса обуславливает необходимость обеспечения пониженного давления в рабочей системе (0,01–0,001 МПа), малого содержания CO₂ при усложнении конструкции электродов.

Импульсно-периодический ТЛ «Лантан» характеризуется средней мощностью 1–2 кВт, длительностью импульсов 10–100 мкс при их частоте 250 Гц.

Разработаны и более мощные технологические CO₂-лазеры типа ТЛ-10 непрерывного действия мощностью до 10 кВт, работающие на безгелиевой смеси, что способствует значительному снижению эксплуатационных расходов. Ведутся работы по созданию еще более мощных лазеров. Для достижения необходимого эффекта упрочнения достаточно непрерывного излучения мощностью 1–5 кВт. С дальнейшим ее повышением возрастает производительность обработки, но при этом усложняется кон-

струкция установки, хотя и снижаются затраты на 1 кВт мощности излучения. Создание лазерных промышленных установок связано с решением следующих проблем: повышением коэффициента их полезного действия; обеспечением стабильности мощности излучения; улучшением модовых характеристик излучения; созданием оптических систем, длительным повышением надежности всей установки; обеспечением компактности установки; снижением стоимости изготовления и эксплуатации.

Некоторые характеристики лазерных технологических установок приведены в табл. 6.2.

Развитие лазерной технологии вызывает необходимость создания мощных, стабильных в работе лазерных гибких технологических комплексов.

Перспективным является создание многолучевой лазерной станции высокой мощности (20–100 кВт) с распределением излучения требуемой мощности по рабочим местам с помощью лучеводов для осуществления различных операций технологического процесса изготовления изделия: резки металла, прошивки отверстий, сварки, упрочнения, легирования, контрольных операций.

В настоящее время наиболее широкое применение для обработки материалов находят три типа лазеров:

- твердотельные на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом (ИАГ, Nd);
- твердотельные на стекле с неодимом (СТ:Nd);
- молекулярные, или газовые на диоксиде углерода CO_2 .

Лазеры указанных типов обладают большой выходной мощностью, относительно высоким КПД и стабильностью параметров излучения.

Твердотельные лазеры, используемые в настоящее время для технологических целей в машиностроении, достигают среднего уровня мощности 50–500 Вт, а промышленные, серийно выпускаемые газовые лазеры на CO_2 , – более 15 кВт.

В мощных твердотельных лазерах активный элемент представляет собой кристаллическое (иттрий-алюминиевый гранат) или аморфное (стекло) вещество, в которое путем легирования введены примесные ионы (Nd^{3+}), генерирующие лазерное излучение.

Таблица 6.2

Характеристики лазерных технологических установок

Установ-ка	Мощность лазерного излучения, кВт	Диаметр луча, мм	Расходи-мость излу-чения, мрад	Потребляе-мая мощ-ность, кВт	Промыш-ленный КПД, %	Масса, кг
ГТЕ-971	1,2	13	1,4	20	6	2336
ГТЕ-973	2,5	46	3,3	30	8,3	3878
ГТЕ-975	5	46	3,3	60	8,3	5425
ЛГН-702	0,8	45	2	18	5	1100
Гарпун-5000	0,5-5	40	2	70	5-6	3000
Катунь	0,8	45	2	18	12	690
Иглан	2,5	96	2	60	4	3650
ЛТ1-2	До 5	45	5	80-100	5-7	5500
ЛТУ1-2	1,2	80	2	40-60	3-4	2650

Новый перспективный этап в развитии лазерной обработки материалов наступил с созданием газовых лазеров, способных развивать в настоящее время наибольшую среднюю мощность в непрерывном и импульсно-периодическом режимах генерации.

В газовых лазерах активной средой является чистый газ, смесь нескольких газов или смесь газа с парами металла, возбуждаемая электрическим разрядом при протекании химических реакций или в процессе адиабатического истечения нагретого газа через сверхзвуковое сопло. В соответствии с этим различают газовые электроразрядные, химические и газодинамические лазеры.

Химические и газодинамические лазеры пока не находят широкого технологического применения.

Наибольшее применение в технологических установках получили электроразрядные СО₂-лазеры, в которых используются

нижние колебательные уровни «возбужденных» молекул CO_2 для генерации инфракрасного излучения с длиной волны 10,6 мкм.

Для повышения эффективности генерации излучения молекул углекислого газа в большинстве CO_2 -лазеров используется газовая смесь с различным процентным содержанием диоксида углерода (CO_2), азота (N_2) и гелия (He). Добавка азота в рабочую газовую смесь способствует усилению генерации лазерного излучения, а гелий в основном интенсифицирует отвод теплоты во время генерации вследствие высокой теплоемкости и теплопроводности, понижая тем самым общую температуру смеси.

В CO_2 -лазерах наиболее распространена схема с самостоятельным электрическим разрядом, совмещающим функции накачки рабочей смеси и ионизации. Такие типы лазеров конструктивно оформляются наиболее просто, и в большинстве известных отечественных и зарубежных лазеров мощностью излучения до 10 кВт используется схема электроразрядного лазера с самостоятельным разрядом.

Следует остановиться на особенностях лазеров с несамостоятельным разрядом, в которых используется внешний ионизатор и разрядная накачка рабочей смеси. Известны схемы ионизации электронным пучком и периодическими импульсами.

Для создания малогабаритных лазеров повышенной мощности (10 кВт и более) используют конструкции с несамостоятельным разрядом с внешней ионизацией в виде пучка быстрых электронов. Известные модели этого типа отечественной разработки CO_2 -ЭИЛ и зарубежной HPL-15 мощностью до 15 кВт представляют практический интерес для обработки материалов мощным лазерным излучением.

На основе несамостоятельного разряда с ионизацией периодическими импульсами создана отечественная лазерная установка «Циклон» номинальной мощностью 6 кВт, обладающая высоким качеством излучения при сравнительно простой схеме исполнения.

Большую перспективу для лазерных технологических установок представляет быстропротекающий лазер «Лантан», в котором преионизация осуществляется короткими емкостными разрядами. Этот лазер генерирует излучение как в непрерывном режиме с мощностью $P = 2,0$ кВт, так и в импульсно-периодическом режиме со

средней мощностью $P_{\text{ср}} = 1,2$ кВт. Причем весьма важным для практического использования является простой переход от непрерывного режима генерации к импульсно-периодическому переключением схемы электропитания и изменением состава газовой смеси.

В современных конструкциях CO_2 -лазеров для увеличения эффективности использования рабочей смеси необходимо поддерживать ее температуру на оптимальном уровне и не допускать перегрева. С этой целью осуществляется охлаждение либо по принципу отвода теплоты от разрядной трубки (CO_2 -лазеры с диффузионным охлаждением рабочей смеси), либо непосредственной циркуляцией рабочей смеси с целью замены нагретых объемов (лазеры с конвективным охлаждением).

Непрерывные CO_2 -лазеры с диффузионным охлаждением рабочей смеси, иногда называемые лазерами с медленной прокачкой, как правило, конструируются в виде водоохлаждаемых разрядных трубок. Такие лазеры обеспечивают высокие показатели удельных мощностей, снимаемых с единицы длины блока генерации.

Однако излучение лазеров с диффузионным охлаждением отличается повышенной расходимостью из-за наличия большого числа поворотных зеркал и многомодового характера излучения. Вследствие этого при фокусировке излучения максимальные значения плотности мощности ограничены (10^4 – 10^5 Вт/см²). К лазерам данного типа относятся отечественные лазеры «Иглан-3» мощностью 3 кВт, МКТЛ-1 мощностью 1,0 кВт, «Юпитер» мощностью 1,0 кВт, а также М-400 (Ferranti, Англия) мощностью 0,4 кВт и лазер фирмы «PhotonSouresInc» (США) мощностью 1,0 кВт.

В отличие от схемы диффузионного охлаждения в непрерывных CO_2 -лазерах с конвективным охлаждением рабочей среды, также называемых лазерами с быстрой прокачкой, достигаются более высокие мощности излучения. В зависимости от направления потока рабочей смеси по отношению к оптической оси резонатора различают лазеры с продольной и поперечной прокачкой.

Одним из отработанных лазеров подобного типа следует считать лазер «Карат». Рабочая смесь CO_2 , N_2 и He благодаря совершенной конструкции установки практически не требует обновления газов в замкнутом цикле прокачки, т. е. процесс лазерной гене-

рации происходит с минимальным расходом газов. Лазер «Карат» обеспечивает высокую временную стабильность мощности излучения на уровне 1–2 кВт и отличается большим техническим ресурсом. Эта модель используется в серийных лазерных технологических установках «Комета» и «Латус-31» для разнообразных видов обработки. Известны модели лазеров такого типа и для больших уровней мощности, например зарубежная модель фирмы UnitedTechnology (США) мощностью 6 кВт. Однако по оценкам специалистов быстропроточные схемы с продольной прокачкой газовой смеси нецелесообразно использовать в конструкциях лазеров мощностью более 5 кВт вследствие технических сложностей и возможного ухудшения качества лазерного излучения.

Большую мощность излучения в установках для лазерной обработки в настоящее время обеспечивают быстропроточные лазеры с поперечной прокачкой газовой смеси, когда направление потока газа перпендикулярно оптической оси лазера. В большинстве современных лазеров данного типа, различающихся некоторыми конструктивными решениями, используется поперечный самостоятельный разряд постоянного тока.

Типичными конструкциями такого типа являются серийно выпускаемые промышленные лазеры фирмы SpectraPhysics (США) GTE-971 мощностью 1,2 кВт, GTE-820 и GTE-973 мощностью 2,5 кВт и GTE-975 мощностью 5 кВт. Газоразрядная камера в этих лазерах представляет собой трубчатый катод и анод, секционированный в поперечном к потоку газа направлении. Такая схема позволяет достигать мощности излучения 1–5 кВт.

[Вернуться в оглавление](#)

6.3. Оптические системы, используемые в технологии лазерной обработки

Лазерное излучение, полученное на выходе из резонатора, как правило, нельзя непосредственно использовать для технологических целей, так как оно не обеспечивает высокой степени концентрации энергии, требуемой для соответствующей технологии, характера распределения плотности мощности в пучке излучения и других выходных характеристик. Для реализации высокопроизводительных процессов лазерной обработки, обеспечения

высокого качества технологии и удобства эксплуатации лазерных установок в производстве применяют различные оптические системы преобразования параметров лазерного излучения.

В любой лазерной технологии основной задачей является обеспечение относительного перемещения луча и обрабатываемой детали. Эта задача решается разработкой различных способов перемещения лазерного луча в случае обработки тяжелых деталей, имеющих большие габариты, или же разработкой соответствующих приспособлений для перемещения обрабатываемых деталей, что является рациональным для малогабаритных деталей.

Схема обработки неподвижных деталей по любому заданному контуру в простейшем случае реализуется с помощью двух подвижных зеркал (рис. 6.2).

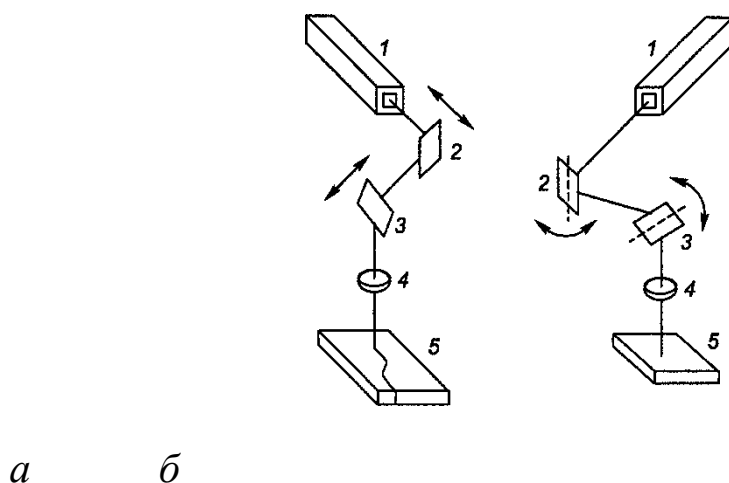


Рис. 6.2. Система перемещения луча двумя подвижными зеркалами

На рис. 6.2, *а* плоские зеркала 2 и 3 перемещаются линейно при их неизменном угловом положении. Зеркало 2 перемещается вдоль оси выходящего из лазера 1 луча, а зеркало 3 перемещается вдоль оси луча, отраженного от зеркала 2. Фокусирующая система 4 и зеркало 3 перемещаются синхронно с зеркалом 2. Перемещение луча можно задать и колеблющимися зеркалами без их линейного перемещения (рис. 6.2, *б*). В этом случае зеркала колеблются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Для обработки неподвижных крупногабаритных деталей может быть использована схема управления лазерным излучением с помощью трех поворотных зеркал (рис. 6.3). Система имеет

подвижную раму 6, перемещающуюся по рельсам 7 над обрабатываемой деталью 8. Первое отклоняющее зеркало 2 направляет луч лазера 1 параллельно направлению перемещения рамы, второе зеркало 3 – вдоль подвижной рамы. Третье зеркало 4 установлено на подвижной каретке 5, перемещающейся совместно с фокусирующей системой 9 вдоль рамы 6.

В различных технологиях лазерной обработки возникает необходимость перемещения луча по траектории окружности. В ряде случаев для этого достаточно направить луч на вращающееся плоское зеркало, установленное под углом 45° к оси луча, или использовать более сложные комбинации плоских зеркал в фокусирующей системе. Оригинальными и простыми в конструктивном отношении являются устройства на основе вращающихся линз.

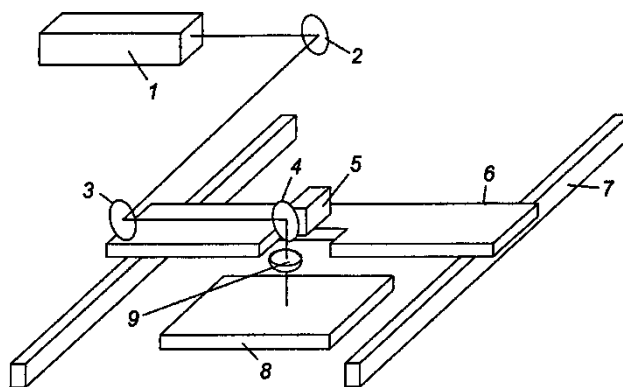


Рис. 6.3. Система перемещения луча тремя зеркалами

Определенный интерес представляет лазерное устройство для обработки поверхностей цилиндрических деталей, которое состоит из трех конических зеркал и фокусирующей линзы (рис. 6.4). Зеркало 2 имеет внешнюю отражательную поверхность, а зеркала 6 и 3 – внутреннюю. Зеркала 2 и 6 преобразуют исходное излучение сплошного или кольцевого сечений в кольцевое излучение большего диаметра. Сфокусированное линзой 5 лазерное излучение 1 после отражения зеркалом 3 попадает на обрабатываемую деталь 4. Обработка деталей осуществляется сразу по всей кольцевой поверхности. Перемещением линзы вдоль ее оси можно регулировать плотность энергии на поверхности деталей. Недостатком этого устройства является создание низкой плотности энергии на обрабатываемой поверхности.

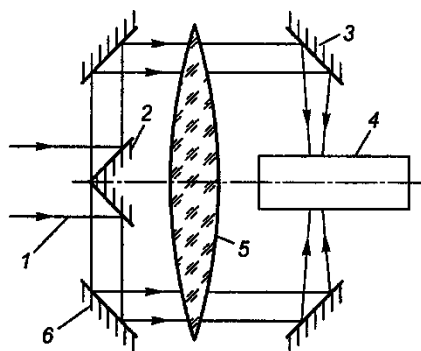


Рис. 6.4. Система для обработки цилиндрических поверхностей деталей

В ряде случаев для увеличения производительности процесса лазерной обработки, в особенности для импульсно-периодической обработки, на изделии следует создать вытянутое пятно нагрева. С помощью цилиндрической линзы можно сфокусировать лазерное излучение в линию. Вытянутое пятно может быть получено также путем установки фокусирующей линзы со смещением оптической оси по отношению к оси лазерного излучения в направлении перемещения деталей при обработке.

Эффективность лазерной обработки в значительной степени определяется поглотательной способностью материала. Все материалы, в том числе и в случае использования поглощающих покрытий, отражают ту или иную часть падающего излучения, снижая энергетическую эффективность процесса обработки. Для повышения эффективности предлагается использовать накладные камеры с отражающим покрытием с внутренней стороны. В камере имеются отверстия для ввода луча и подачи газа. Рассеянное излучение отражается стенками и направляется повторно в зону обработки. Подаваемый в камеру газ служит для защиты обрабатываемой поверхности.

Оптические системы обеспечивают возможность плавного регулирования интенсивности излучения непосредственно в процессе обработки. Это достигается перемещением фокусирующей системы вдоль оси излучения, вследствие чего фокус линзы удаляется или приближается к обрабатываемой поверхности и концентрация энергии в пятне нагрева уменьшается.

Для фокусировки лазерного излучения применяется как прозрачная оптика проходного типа (линзы), так и отражательная металлооптика (зеркала). Фокусирующие прозрачные линзы ис-

пользуются при мощностях лазерного излучения до 1 кВт. При более высоких мощностях используют зеркальные фокусирующие системы из металлооптики, обеспечивающие значительно больший срок службы.

Зеркальную оптику для мощных ТЛ обычно изготавливают из чистой меди, обеспечивающей высокие коэффициенты отражения и теплопроводности. Металлические зеркала изготавливают достаточно массивными и жесткими, чтобы они могли выдерживать высокий уровень лазерного излучения и не допустить значительных тепловых деформаций поверхности.

В лазерах большой мощности применяют принудительное охлаждение медных зеркал водой для снижения тепловых деформаций и повышения стойкости. Для увеличения стойкости зеркал при хранении и эксплуатации рекомендуется использовать защитные и многослойные просветляющие покрытия.

Фокусировка лазерного излучения небольшой мощности (до 1 кВт) обычно осуществляется линзами из оптически прозрачных материалов. Для наиболее распространенных технологических CO₂-лазеров с длиной волны излучения $l = 10,6$ мкм используются искусственные оптические кристаллы из хлористого натрия (NaCl), хлористого калия (KCl), фтористого натрия (NaF), бромистого калия (KBr), бромисто-иодистого таллия марки KRS-5 и бромисто-хлористого таллия марки KRS-6, фтористого бария (BaF₂). Менее распространены оптические линзы из германия (Ge), селенида цинка (ZnSe), теллуристого кадмия (CdTe), кремния (Si), арсенида галлия (GaAs), имеющие более высокий коэффициент преломления и вследствие этого увеличенные потери на отражение. Поэтому на линзы из этих материалов требуется наносить интерференционные просветляющие покрытия.

[Вернуться в оглавление](#)

6.4. Тепловые процессы в металлах при лазерной обработке

Лазерным сфокусированным излучением можно нагревать материалы со сверхвысокими скоростями (до 10^4 – 10^5 °C/c) в малых объемах. При этом за счет теплоотвода в основу материала обеспечиваются и скорости его охлаждения такого же порядка. Это дает возможность фиксировать крайне неравновесные состо-

яния материала, при которых не успевают произойти фазовые и структурные превращения. Необходимый температурный режим нагрева материала определяется плотностью поглощаемого им теплового потока. При плотности потока до 10^7-10^8 Вт/м² происходит нагрев материала без его плавления или испарения, при ее повышении до $10^{10}-10^{11}$ Вт/м² материал плавится, а при еще большей плотности теплового потока имеет место испарение поверхностного слоя материала.

На процессы, происходящие в материале при лазерном нагреве, определяющее влияние оказывают пространственно-временные характеристики и интенсивность излучения. Воздействие излучения сопровождается процессами массо- и теплопереноса в материале, развитие которых зависит от энергии и продолжительности воздействия излучения. Регулируя эти две характеристики, можно создавать такие условия, при которых в металлах могут реализовываться процессы закалки, легирования, наплавки, глянцеваания, шокового упрочнения, прошивки отверстий, резки и др.

Важной характеристикой лазерного излучения является пространственное распределение его мощности. Для большинства излучателей она имеет Гауссово распределение. При лазерной обработке для получения однородных физико-механических свойств упрочняемой поверхности необходимо обеспечить равномерное распределение поглощаемой энергии.

С увеличением длины волны излучения значительно уменьшается поглощательная способность обрабатываемых материалов. А это в свою очередь оказывает существенное влияние на производительность процесса лазерной обработки. От длины излучения зависит также и глубина его проникновения в объем обрабатываемого материала.

$$E(x) = E_0 \cdot (1 - R) \cdot e^{-\alpha x}, \quad (6.1)$$

где $E(x)$ – энергия излучения на глубине x ; E_0 – энергия излучения на поверхности материала; R – коэффициент отражения; α – коэффициент поглощения.

Количество поглощенной энергии плавно уменьшается в пределах толщины слоя материала порядка $1/\alpha$ ($10^{-4}-10^{-5}$ см для

металлов). Энергия поглощается в основном в результате взаимодействия излучения с электронами проводимости поверхностного слоя тел, преобразуясь в тепловую энергию. Температуру поверхности тела (до температуры его плавления) можно оценить следующей зависимостью:

$$T_s = T_0 + \frac{2F_0(1-R)}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{c\tau}{\pi}}, \quad (6.2)$$

где T_0 – начальная температура; F_0 – падающий световой поток; c – коэффициент температуропроводности материала; λ – коэффициент теплопроводности; τ – время взаимодействия излучения с поверхностью.

При плавлении поверхностного слоя изделия граница раздела жидкой и твердой фаз перемещается в глубь материала, поэтому зависимость глубины проплавления от поглощенной энергии нелинейна и усложняется из-за различия теплофизических свойств твердой и жидкой фаз.

Для приближенной оценки глубины проникновения излучения в материал за время τ можно использовать следующее выражение (учитывается, что после поглощения энергии поверхностным слоем толщиной $1/\alpha$ теплота излучения распространяется в глубь материала за счет теплопроводности).

$$D = 2\sqrt{c\tau}. \quad (6.3)$$

Глубина нагрева уменьшается с увеличением интенсивности лазерного излучения, так как при этом происходит более быстрый нагрев поверхностного слоя материала.

[Вернуться в оглавление](#)

6.5. Подготовка поверхности деталей перед лазерным упрочнением

Эффективность лазерного упрочнения определяется коэффициентом поглощения лазерного излучения поверхностью деталей. Поглощательная способность обрабатываемой поверхности зависит от длины волны излучения, свойств и состояния поверхности деталей, условий лазерного нагрева и составляет 20–30 %. При лазерной обработке в режимах, не изменяющих исходных параметров шероховатости поверхности, поглощательная способность последней низкая и тем ниже, чем больше длина волны. При длине волны свыше 5 мкм поглощение зависит от электропроводности материала: чем выше электропроводность, тем ниже поглощение. Поглощательная способность поверхности изменяется при облучении.

$$A = A_0 + A_1(T - T_0), \quad (6.4)$$

где A_0 , T_0 – начальные значения поглощательной способности и температуры; A_1 – скорость изменения поглощательной способности с ростом температуры.

Температура поверхности детали $T(0, \tau)$ изменяется во времени следующим образом:

$$T(0, \tau) = T_0 + (T_0 + \frac{A_0}{A_1}) \left[e^{u^2} (1 + \operatorname{erf} u) - 1 \right], \quad (6.5)$$

где $u = F_0 A_1 \tau / Kc$; c – удельная теплоемкость материала.

Резкое повышение коэффициента поглощения начинается при температуре плавления металла, что приводит к значительному росту температуры поверхностного слоя. Это является положительным фактором, так как большая часть энергии излучения поглощается поверхностным слоем. Отсюда следует, что пороговая плотность потока излучения, необходимого для достижения на поверхности детали температуры плавления материала, должна снижаться примерно в 1,6–3,6 раза.

Следует обратить внимание на высокие значения коэффи-

циента отражения металлических поверхностей при воздействии излучением CO₂-лазеров, рассматриваемых в настоящее время в качестве перспективных мощных ТЛ (табл. 6.3). Поглощательная способность неокисленной металлической поверхности на длине волны лазерного излучения $l = 10,6$ мкм определяется уравнением Хагена-Рубенса:

$$A = \frac{112,2}{\sqrt{\sigma_0}}, \quad (6.6)$$

где σ_0 – удельная электрическая проводимость металла для постоянного тока, Ом/м.

Электрическая проводимость металлов уменьшается с ростом температуры, именно поэтому и возрастают коэффициенты поглощения. Кроме этого, важным фактором является состояние поверхности. В частности, если лазерная обработка поверхности осуществляется в воздушной или какой-либо другой окислительной среде, то происходят рост оксидной пленки на поверхности образца и увеличение поглощательной способности (табл. 6.4). Коэффициент поглощения инфракрасного излучения с длиной волны излучения $l = 10,6$ мкм окисленной поверхностью возрастает в несколько раз.

Таблица 6.3

Коэффициенты отражения

Характеристика лазера		R металла			
Активное вещество	λ , мкм	Золото	Хром	Серебро	Никель
Аргон	0,488	0,415	0,437	0,952	0,597
Рубин	0,694	0,930	0,831	0,961	0,676
ИАГ-Nd	1,064	0,981	0,901	0,964	0,741
Углекислый газ	10,600	0,975	0,984	0,989	0,942

Таким образом, энергетическая эффективность процессов лазерной обработки может быть значительно повышена соответствующей обработкой поверхности. Эффект достигается изменением как топографии поверхности, так и химического состава. По некоторым данным, увеличение степени шероховатости Rz от 34

до 120 мкм приводит к увеличению коэффициента поглощения инфракрасного излучения в 1,2–1,5 раза для коррозионно-стойкой стали и в 2,5–2,8 раза для технического железа. Поглощательная способность возрастает в 2–2,5 раза при использовании в качестве покрытия мелкой металлической пудры или специальной краски с высоким значением коэффициента поглощения.

Таблица 6.4

Коэффициенты поглощения ($l = 10,6$ мкм)

Металл	Поглощательная способность поверхности (A)	
	полированной неокисленной	окисленной ($T = 873$ K, $t = 2$ ч)
Золото	0,010	–
Алюминий	0,034	0,25–0,50
Железо	0,050	0,33–0,74
Цинк	0,083	0,45–0,56
Титан	0,094	0,18–0,25

Изменение топографии поверхности с целью повышения эффективности лазерной обработки не всегда представляется технологически оправданной операцией, тогда как использование различных поглощающих покрытий, существенно увеличивающих эффективность лазерной обработки, в особенности, если последняя осуществляется при сравнительно низких температурах ($T < T_{пл}$), является безусловно оправданным. При операциях лазерной поверхностной термообработки, особенно гладких шлифованных поверхностей, применение поглощающих покрытий становится в большинстве случаев обязательным условием.

Подготовка поверхности деталей перед лазерной обработкой заключается в создании слоя, характеризующегося максимальным коэффициентом поглощения лазерного излучения.

В режимах закалки деталей, когда процесс ведется без их оплавления, происходит значительное отражение излучения поверхностью. Одним из путей повышения коэффициента поглощения является нанесение на детали поглощающих покрытий.

Покрытие должно обладать коэффициентом поглощения не

ниже 0,8–0,9 и при воздействии лазерного излучения не должно оказывать влияния на структуру и свойства зоны обработки. Кроме того, оно должно легко наноситься и удаляться, а также иметь стабильную толщину по поверхности изделия, быть тугоплавким, обладать хорошей теплопроводностью и при оплавлении смачивать подложку для улучшения условий теплопередачи. Вещества, входящие в состав покрытия, должны иметь высокий коэффициент поглощения.

Наиболее часто используются методы оксидирования и нанесения покрытия из вольфрама, оксида меди или в виде красок.

Об эффективности поглощающих покрытий судят по глубине зоны их термического влияния при одинаковых условиях облучения.

При малой мощности излучения глубина закалки при фосфатном покрытии в 2 раза превышает глубину закалки без покрытия. В случае покрытия из гуаши глубина закалки на 10 % меньше, чем в случае фосфатного покрытия, нанесение черных окрашивающих слоев, содержащих сажу, не дает эффекта. Наилучшие результаты дают покрытия из фосфата марганца, характеризующиеся коэффициентом поглощения около 0,9, стабильностью толщины слоя.

Рассмотрим некоторые положения, определяющие выбор покрытия для поверхностной обработки. Главным условием является высокая оптическая поглощательная способность покрытия. Чем выше электрическое сопротивление покрытия, тем лучше его поглощательная способность.

Состав покрытия должен быть простым в изготовлении, недорогим, легко наносимым на поверхность с обеспечением высокой адгезионной способности с металлом, безвредности и стабильности при длительном хранении. Покрытие должно обладать достаточно высокими температурами плавления и испарения, а также высокой теплопроводностью для обеспечения подвода энергии к обрабатываемому металлу.

Универсального покрытия, в равной степени удовлетворяющего основным требованиям, не найдено. Находят применение следующие типы покрытий: химические покрытия: фосфатирование марганцем или цинком, сульфидирование, оксидиро-

вание и др.; красящие составы, содержащие оксиды металлов Al, Zn и др.; коллоидные растворы углерода в ацетоне, спирте и др.; напыленные оксиды различных металлов; сажа, получаемая на поверхности при сжигании резины, масел и т. д.

Кроме рассмотренных выше факторов (состояние и форма поверхности), на поглощательную способность металлов влияют характер распределения плотности мощности в фокальном пятне, направленность облучения, угол сходимости лазерного луча и др. Однако решающее влияние на поглощательную способность оказывает уровень плотности мощности лазерного излучения в зоне обработки.

Некоторые способы подготовки поверхности деталей могут использоваться только в условиях крупносерийного и массового производства, так как требуют специального оборудования.

Для ремонтного производства рекомендуются более простые способы нанесения поглощающих покрытий. Самым простым является метод нанесения на поверхность детали слоя сажи. При этом обеспечивается стабильная толщина покрытия. Контроль осуществляется визуально. Покрытие легко удаляется с поверхности.

При нанесении на поверхность легирующих материалов, например В, TiO_2 , WC, W и самофлюсующихся сплавов типа ПН-ХН80СЗРЗ, ПН-ХН80С4Р4 дополнительного чернения можно не применять, так как оно незначительно изменяет поглощательную способность поверхности.

Удовлетворительные результаты дает нанесение на упрочняемую поверхность детали раствора желтой гуаши с помощью пульверизатора или кисти.

[Вернуться в оглавление](#)

6.6. Термическое упрочнение поверхностей лазерным излучением

К лазерной поверхностной упрочняющей технологии относятся: лазерная закалка сталей и чугунов, лазерное легирование поверхностного слоя материалов и комбинированные методы (сочетание диффузионного насыщения поверхностных слоев с последующей лазерной обработкой, газотермическое напыление

с последующим оплавлением покрытия лучом лазера и др.). Они основаны на использовании энергии лазерного излучения различной интенсивности.

В настоящее время лазеры наиболее широко применяются для поверхностной закалки. При этом тонкий поверхностный слой материалов разогревается до температуры, близкой к температуре плавления, со скоростями порядка 10^3 – 10^5 °C/с. После прекращения воздействия лазерного излучения происходит сверхбыстрое охлаждение поверхностного слоя за счет теплопередачи в основной объем металла.

Лазерная закалка обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами термической обработки.

В режиме закалки без оплавления не нарушается микрогеометрия поверхности изделий, и поэтому лазерная закалка является финишной операцией.

Имеет место разогрев только тонкого поверхностного слоя. При таком режиме температура детали повышается незначительно, благодаря чему отсутствуют температурные деформации при обработке тонкостенных и крупных деталей.

Возможность локального упрочнения только рабочих поверхностей деталей приводит к значительной экономии энергии.

Возможно упрочнение деталей сложной формы и по сложной траектории.

За счет обеспечения сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения при воздействии концентрированного пучка лазерного излучения можно повышать твердость поверхностного слоя до значений, не достижимых при других методах термообработки.

Эти преимущества делают лазерную закалку во многих случаях единственно возможной упрочняющей операцией.

Возможности лазерной закалки зависят от марки материала детали. Материал может быть упрочнен до той твердости, которая определяется фазовыми и структурными изменениями, происходящими в нем. Процесс лазерной обработки с целью термоупрочнения характеризуется высокими скоростями охлаждения, которые приводят к закалке поверхностных участков. Для получения мартенсита в сплавах железо-углерод в интервале температур минимальной устойчивости аустенита (673–873 К) необходимо обеспечить скорости охлаждения больше критических, ко-

торые для большинства сплавов железа находятся в интервале 50–200 К/с. Охлаждение при лазерном термоупрочнении без оплавления характеризуется значительно большими скоростями. Существенное увеличение скорости охлаждения не изменяет состава фаз структур. При лазерном термоупрочнении в сталях получают те же фазы и структуры, что и при обычной закалке: мартенсит, цементит (карбиды), остаточный аустенит. Но высокие скорости охлаждения вызывают большую неоднородность структуры, связанную с неомогенностью аустенита. Возникает повышенная дефектность структуры вследствие усиления фазового наклепа, замедления процессов отжига и рекристаллизации. При этом происходят измельчение блоков, увеличение плотности дислокации и рост напряжений в кристаллической решетке. Образующийся мартенсит более дисперсный, чем при обычной закалке.

Из рассмотренных особенностей образования структур видно, что микротвердость сталей после лазерной закалки на 2000 МПа и более выше микротвердости сталей, подвергнутых обычным видам закалки. Однако эта характеристика обеспечивается оптимальными режимами обработки.

С целью увеличения глубины упрочненного слоя лазерную обработку выполняют с оплавлением поверхности.

Конечная структура формируется в результате охлаждения расплавленного металла. Для осуществления закалки из жидкой фазы необходимо обеспечить высокие скорости охлаждения расплавленного металла, что достигается при лазерной обработке с оплавлением поверхности.

Скорость охлаждения оказывает значительное влияние на строение, структуру и свойства затвердевшего участка поверхности. При большой скорости охлаждения размер зерен уменьшается, хотя однозначную связь установить трудно. Это связано с тем, что основные параметры кристаллизации – скорость роста кристаллов и скорость образования зародышей – имеют сложную зависимость от переохлаждения, т.е. от разности температур равновесного ликвидуса и действительной температуры кристаллизации.

Однородность химического состава кристаллизующегося объема металла в значительной степени определяется скоростью охлаждения. При скоростях охлаждения 10^3 – 10^6 К/с имеет место

дендритная ликвация, когда участки зерен, затвердевшие в начале кристаллизации (центральные оси дендритов), обогащены тугоплавкими элементами, а участки зерен, затвердевшие в конце кристаллизации, обогащены легкоплавкими элементами. При скоростях охлаждения более 106 К/с формируется плоский слой кристаллизации, перераспределение элементов в жидкой фазе не успевает происходить, и дендритная ликвация резко уменьшается.

Скорость охлаждения оказывает существенное влияние на процесс образования фаз и структурных составляющих при кристаллизации и прежде всего на формирование эвтектики. С высокими скоростями охлаждения связаны особенности твердых растворов. При увеличении скорости охлаждения концентрация растворенного элемента в твердом растворе увеличивается по сравнению с равновесной концентрацией. Такие твердые растворы называют метастабильными или пересыщенными.

При обеспечении сверхвысокой скорости охлаждения возможно образование аморфных структур, когда не успевают вырасти центры кристаллизации и объем металла затвердевает как стеклообразная масса, в которой существует некоторый ближний порядок.

При лазерном термоупрочнении отдельные слои обрабатываемого участка прогреваются по глубине до различных температур, вследствие чего зона лазерного воздействия (ЗЛВ) имеет слоистое строение. В зависимости от микроструктуры и микротвердости в сталях по глубине ЗЛВ различают три слоя.

Первый слой – зона оплавления, имеет место при закалке из расплавленного состояния. Как правило, зона оплавления имеет столбчатое строение с кристаллами, вытянутыми в направлении теплоотвода. Основная структурная составляющая - мартенсит, карбиды обычно растворяются. При оптимальных режимах закалки с расплавлением обезуглероживания не происходит, кратеры и шлаковые включения отсутствуют. При лазерной закалке без оплавления первый слой отсутствует.

Второй слой – зона закалки из твердой фазы. Его нижняя граница определяется температурой нагрева до АС₁. В этом случае наряду с полной закалкой происходит и неполная. По глубине данный слой характеризуется структурной неоднородностью. Ближе к поверхности имеются мартенсит и остаточный аустенит,

полученные при охлаждении из гомогенного аустенита. Ближе к исходному металлу наряду с мартенситом имеются элементы исходной структуры: феррит в доэвтектоидной стали и цементит в заэвтектоидной.

Третий слой – переходная зона, в которой металл нагревался ниже точки АС₁. Если сталь имеет исходное состояние после закалки или отпуска, то в результате лазерной обработки в этом слое образуются структуры отпуска – троостит или сорбит, характеризующиеся пониженной микротвердостью.

Подобное слоистое строение характерно для лазерной обработки как импульсным, так и непрерывным излучением для некоторых сталей. Есть ряд материалов, не поддающихся упрочнению лазерной обработкой из-за отсутствия в них фазовых превращений.

Для более широкого изменения физико-механических свойств поверхностного слоя деталей применяется лазерное легирование, позволяющее получать на их рабочих поверхностях слои с заданными химическим составом и физико-механическими характеристиками. Его суть заключается в следующем. На поверхность детали наносится тонкий слой покрытия из легирующих элементов, затем производится совместное проплавление лазерным лучом материала покрытия и основы.

Легирующие покрытия могут наноситься различными способами: напылением, обмазкой в виде эмульсии, прикаткой фольги, электрохимическим осаждением, электроискровой обработкой, но при этом должны обеспечиваться легкое удаление остатков материала покрытия с неупрочняемых участков и хороший термический контакт покрытия с материалом основы.

В результате совместного проплавления материала покрытия с основой образуется поверхностный слой нового химического состава. Высокая концентрация легирующих элементов в поверхностном слое возможна потому, что расплав после прекращения воздействия лазерного излучения охлаждается с очень высокой скоростью и избыточная фаза не успевает выделиться. Это иногда приводит к возникновению больших остаточных напряжений и появлению трещин в деталях. Глубина легированного слоя зависит от мощности излучения и может составлять 0,1–1,5 мм. При лазерном легировании чаще всего нельзя обеспечить значительное повышение твердости поверхностных слоев по

сравнению с лазерной закалкой, но при этом улучшаются другие эксплуатационные свойства материалов, например: жаропрочность, коррозионная стойкость и т. д.

Еще одним перспективным направлением использования лазерного излучения является обработка диффузионных покрытий. Как известно, диффузионное насыщение элементами, образующими в металлах и сплавах высокотвердые химические соединения (бориды, карбиды, нитриды), обеспечивает получение износостойких поверхностных слоев деталей. Однако эти слои характеризуются двумя существенными недостатками – они имеют малую толщину (обычно не более 100 мкм) и высокую хрупкость, для устранения которых необходима последующая лазерная обработка.

Широкое распространение в настоящее время для нанесения покрытий получили методы лазерной наплавки, в частности газопорошковой. Газопорошковая лазерная наплавка (ГПЛН) осуществляется путем подачи порошкового материала из бункера с помощью инжекторного устройства непосредственно в зону воздействия лазерного луча. На размеры и форму наплавленных валиков, кроме энергетических параметров процесса наплавки, влияют условия подачи порошка, его массовый расход, дистанция нанесения, угол наклона оси питателя к лазерному лучу.

Технология нанесения покрытий таким способом отличается простотой, возможностью постепенного наращивания наплавленного слоя, в отличие от других способов, когда плавление идет от поверхности слоя к материалу основы, низкой энергоемкостью.

ГПЛН обеспечивает возможность обработки деталей различных конфигураций, создает благоприятные условия для получения покрытий из легкоплавких металлов и сплавов на поверхности тугоплавких, для нанесения материалов, склонных к разложению при расплавлении или склонных к растворению в материале основы. В то же время данный способ наплавки характеризуется низким коэффициентом использования материала, который в значительной степени зависит от режимов обработки.

Нанесенные покрытия могут иметь значительную пористость. Кроме того, для получения прочной адгезионной связи материал покрытия наносится на разогретую подложку, что приводит к интенсивному перемешиванию наплавленного материала с основой и снижению качества покрытия, прежде всего, его

микротвердости. Коэффициент перемешивания имеет сложную зависимость от скорости обработки, мощности излучения, степени расфокусировки луча и при оптимальных режимах составляет 0,04–0,18. При увеличении мощности излучения коэффициент перемешивания может возрасти до 0,30. Глубина проплавления материала подложки и коэффициент перемешивания по длине валика неравномерны. Наиболее существенными недостатками метода являются возникновение трещин в наплавленных валиках и значительная неравномерность геометрического профиля нанесенного слоя. Повышенная шероховатость, волнистость обуславливают значительное увеличение объема механической обработки, повышение затрат времени и инструмента, снижение коэффициента использования материала покрытия. В связи с этим ГПЛН перспективна в тех случаях, где необходимо повысить эксплуатационные свойства небольших участков поверхности. В настоящее время разработаны и получили промышленное применение технологические процессы лазерной наплавки таких деталей, как клапаны двигателей и гидросистем, кулачковые валы топливных насосов, распределительные валы, оси различных агрегатов.

Вторым методом получения покрытий с помощью лазерного излучения является оплавление предварительно нанесенных слоев – лазерное плакирование. Метод заключается в расплавлении концентрированным лучом предварительно нанесенного на поверхность детали материала, который после быстрого охлаждения образует упрочняющее покрытие.

Предварительное нанесение присадочного материала может осуществляться методом насыпания порошков, нанесения специальных паст, накаткой фольги, наложением прутков и т. д. Однако каждому из этих методов присущи свои недостатки. Так, насыпание порошков не позволяет обрабатывать детали сложной формы, исключает возможность местной защиты струей газа вследствие сдувания порошка. При оплавлении порошковых паст сгорание или разложение связующих веществ сопровождается рядом нежелательных эффектов: по обеим сторонам наплавленного валика образуются оголенные зоны, что затрудняет получение сплошных покрытий; наплавленные валики имеют значительную неравномерность по высоте и ширине, характеризуются высоким коэффициентом перемешивания с основой. При оплав-

лении фольг, прутков и проволок происходит сильное отражение излучения. Кроме того, не все материалы могут быть получены в компактной форме. Получение широких поверхностных слоев с перекрытием полос может осуществляться при лазерном оплавлении напыленных покрытий. Применение газотермического напыления (ГТН) позволяет предварительно наносить слои самых разнообразных материалов на детали любой конфигурации и площади, а также локальные участки поверхности, при напылении не происходит насыщения покрытия материалом основы, газопорошковый поток не оказывает значительного термического влияния на основу. Технологический процесс напыления обеспечивает высокую производительность нанесения покрытий и характеризуется относительно небольшой трудоемкостью.

Обработка плазменных покрытий непрерывным лазерным излучением позволяет повысить их устойчивость к коррозии и к различным видам изнашивания, снизить пористость и поверхностную неоднородность, воздействовать на микроструктуру и повысить адгезию покрытия к подложке. Лазерной обработке подвергаются покрытия из самых разнообразных материалов: кобальта, никеля, железа и сплавов на их основе, титана, кремния, оксида алюминия и других. Режимы процесса плакирования подбираются так, чтобы получить прочную связь покрытия с основой при условии минимального подплавления поверхности детали для наименьшего проникновения материала основы в плакирующий слой.

[Вернуться в оглавление](#)

6.7. Примеры практического применения лазерной термической обработки

На предприятиях различных отраслей у нас и за рубежом (табл. 6.5, 6.6) осуществляется лазерное упрочнение ряда деталей узлов и механизмов автомобилей и другой техники. Аналогичный процесс, в частности, выполняется на ВАЗе при упрочнении сферы корпуса дифференциала раздаточной коробки, изготовляемого из перлитного ковкого чугуна. Стендовые испытания показали увеличение долговечности в 6–10 раз по сравнению с нетермообработанными корпусами.

Таблица 6.5

Детали и узлы, упрочняемые лазерным излучением

Деталь, узел	Фирма	Режим обработки и результаты
Втулки направляющие (перлитный чугун)	«Форд», «Дженерал Моторс»	Мощность – 0,4 кВт, диаметр луча – $D = 1,5$ мм; скорость перемещения луча по поверхности – $V = 2,75$ м/мин; глубина упрочненного слоя $h = 0,25$ мм; HRC = 60
Гильзы цилиндра (серый чугун)	«Катерпилер», «Сильвания»	$H = 0,7$ мм
Пазы в поршнях, кулачки распределительного вала, зубчатые колеса (все детали из чугуна)	«Дженерал Моторс», «Авко»	Мощность – 6 кВт, глубина упрочненного слоя $h = 1,25$ мм; HRC = 60 Деформация 0,13 мм. Последующая обработка не требуется
Дорожки качения подшипников (сталь), тормозной барабан (чугун)	«Дженерал Моторс», «Сильвания»	Зубчатые колеса упрочняются CO ₂ -лазером. Мощность – 10 кВт, глубина упрочненного слоя $h = 0,4-0,7$ мм; HRC 57–60

В ПО «АвтоЗИЛ» производится лазерное упрочнение головки блока цилиндров автомобиля. Срок службы деталей повышается в 2–3 раза. Значительную экономию может дать ЛТО (лазерная термическая обработка) внутренних поверхностей гильз цилиндров двигателей автомобиля.

ЛТО чаще всего осуществляется с помощью установок типа «Квант», «Комета» и «Катунь». Дальнейшее развитие и распространение этих процессов связано с созданием новых, более мощных и совершенных технологических лазеров.

Исследования, проведенные в лаборатории лазерной технологии МАЗа, показали, что ЛТО обеспечивает повышение износостойкости по сравнению с нормализованными или не термообработанными стальными и чугунными деталями.

Таблица 6.6

**Лазерное термическое упрочнение быстроизнашивающихся
деталей автомобиля (по зарубежным данным)**

Наименование детали	Материал	Глубина упрочнения h, мм	Твердость HRC	Мощность лазера, кВт
Картер рулевого управления	ферритный чугун	0,25-0,35	60	0,5-1,0
Спиральные канавки гильзы цилиндра двигателя	серый чугун	0,25-0,3	60	5,0
Седло и направляющая втулка клапана ДВС	серый чугун	0,25	60	0,4
Зубчатые колеса	чугун	0,4-0,7	57-60	10,0
Кулачки распределительного вала	чугун	1,25	60	6,0
Канавки поршней, кулачки распределительных валов, дорожки качения подшипников, галтели коленчатых валов	сталь АЕ 1050	0,2-0,38	60-64	0,5

Фирма «Фиат» (Италия) производит упрочнение коленчатых валов, позволяет отказаться от последующих операций механической обработки. Автомобильные фирмы США рекомендуют ЛТО для канавок чугунных поршней, седел клапанов, кулачков распределительных валов, дорожек подшипников качения, галтелей коленчатых валов, других деталей. Фирма «Бею ЛТД» (Англия) проводит ЛТО и исследует возможности упрочнения этим методом деталей топливного насоса дизелей, шеек и выступов кулачковых валов, трущихся поверхностей гильз цилиндров, деталей тормозных цилиндров. ЛТО наиболее эффективно для ранее не подвергаемых термическому упрочнению чугунных и стальных деталей. Вместе с тем необходимо избегать чрезмерного увлечения этим процессом для замены традиционных процессов закалки или химико-термической обработки.

[Вернуться в оглавление](#)

6.8. Контрольные вопросы

1. Что такое лазер?
2. Из каких понятий складывается идея лазера?
3. Чем характеризуются лазеры?
4. Для каких процессов в машиностроении применяется лазер?
5. Какие три типа лазеров находят в настоящее время наиболее широкое применение для обработки материалов?
6. Какие лазерные установки применяются для упрочнения деталей?
7. Сколько процентов составляет КПД твердотельных лазеров?
8. Что является важной характеристикой лазерного излучения?

[Вернуться в оглавление](#)

ГЛАВА 7. МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Среди методов нанесения защитно-декоративных покрытий в последние годы наблюдается тенденция увеличения практического использования вакуумных ионно-плазменных методов. Техника этих методов, как, впрочем, и большинства вакуумных методов, предусматривает создание потока частиц вещества и взаимодействие этого потока с поверхностью твердого тела. Результат этого взаимодействия проявляется либо в *конденсации* (нанесении, осаждении) вещества на поверхность, либо в *насыщении* (внедрении, легировании, имплантации) веществом поверхностного слоя. Во всей своей массе указанные методы нанесения покрытий в вакууме можно разделить на три вида: термическое испарение, ионное (катодное) распыление и ионное осаждение. Рассмотрим эти методы, сравнив их достоинства и недостатки. Процесс нанесения покрытий термическим напылением в вакууме в настоящее время получил дальнейшее усовершенствование и применение в качестве ионно-термического метода, что роднит его с методами ионного осаждения. Поэтому анализ этого метода целесообразно осуществить в соответствующем подразделе.

[Вернуться в оглавление](#)

7.1. Нанесение покрытий с помощью ионного (катодного) распыления

Катодное распыление (*sputtering*) как метод получения покрытий заключается в бомбардировке положительными ионами твердой мишени (катода) из наносимого материала с осаждением распыленных частиц на поверхности подложки. Источником положительных ионов является плазма электрического разряда (постоянного или высокочастотного), горящего в среде рабочего (инертного) газа.

Процесс катодного распыления характеризуется коэффициентом распыления S , определяемым количеством нейтральных атомов, «выбитых» одним ионом. При бомбардировке мишени положительными ионами наряду с атомами мишени выбиваются вторичные электроны, создающие вторичный электронный ток.

Катодное распыление происходит в том случае, если переданная при соударении и она с поверхностью твердого тела энергия превышает энергию связи атома с поверхностью. Начальная пороговая энергия иона зависит в первую очередь от его массы и по результатам многочисленных экспериментов составляет 20–100 эВ. При увеличении энергии ионов количество распыленных атомов растет, так как ионы, проникая внутрь материала подложки, создают «смещенные атомы», часть которых выходит на поверхность и покидает ее. При дальнейшем увеличении энергии ион может настолько глубоко проникнуть в материал, что смещенные атомы не достигнут его поверхности и коэффициент распыления уменьшится.

Область энергии ионов, представляющая наибольший интерес для получения покрытий ионным распылением, простирается от пороговой энергии до величин приблизительно 5 кэВ.

В связи с тем, что процесс распыления протекает в среде рабочего газа, его давление оказывает существенное влияние на количество осевших на подложку распыленных атомов. Это объясняется тем, что при увеличении давления возрастает число атомов, возвращающихся на мишень в результате столкновения с молекулами (атомами) рабочего газа. Поскольку количество столкновений зависит не только от давления, но и от расстояния «мишень-подложка», обычно рассматривают изменение реального коэффициента распыления как функцию произведения давления на расстояние.

Важной особенностью катодного распыления является возможность распыления многокомпонентных систем без изменения химического состава покрытия. Одинаковый химический состав распыляемого вещества и покрытия сохраняется также и для систем, компоненты которых имеют существенно различающиеся коэффициенты распыления. Подобное соответствие обусловлено структурно-кинетическими закономерностями распыления многокомпонентных систем. Однако при этом обеспечивается воспроизводимость состава, но не точность стехиометрии, так как химические соединения распыляются в виде атомов. В связи с этим наблюдается потеря более летучей составляющей исходной молекулы при переносе от мишени к подложке. Так, например, при распылении оксидов SiO_2 , Al_2O_3

теряется кислород, при распылении сульфидов – сера. Этот дефект может быть исключен введением в вакуумную камеру активного газа.

Используемые в настоящее время ионные распылительные системы можно разделить на две основные группы:

1. плазмоионные, в которых мишень находится в газоразрядной плазме, создаваемой с помощью тлеющего, дугового или высокочастотного разрядов, а распыление происходит за счет бомбардировки мишени ионами, извлекаемыми из плазмы;

2. с автономными ионными источниками без фокусировки и с фокусировкой ионных пучков, бомбардирующих мишень.

Плазмоионные системы классифицируют:

- по количеству электродов (диодные, триодные, тетродные);
- по виду используемого напряжения (постоянное, высокочастотное);
- по наличию или отсутствию потенциала на подложке (со смещением и без смещения).

Промышленное оборудование, реализующее системы ионного распыления, в большом разнообразии и количестве выпускается для нужд микроэлектроники. С его помощью для контактов и электродов наносят пленки золота, серебра, платины; пленки тантала отличаются высокой стабильностью электросопротивления; нитрид тантала и некоторые пленки сплавов используют для конденсаторов.

Новым направлением в применении катодного распыления является его использование для декоративных целей (получение различных орнаментов, рисунков) и для получения тонкого подслоя (хрома, меди и т. п.) на пластмассе с хорошей адгезией к основе. Особенно перспективен этот метод для нанесения покрытий из тугоплавких материалов, которые трудно нанести термическим испарением в вакууме.

Основным недостатком технологии получения покрытий ионным распылением является, при определенных условиях, резкое снижение скорости напыления при реактивном распылении в результате образования химического соединения на мишени.

[Вернуться в оглавление](#)

7.2. Ионное осаждение покрытий

В методах ионного осаждения частицы наносимого материала, переведенного тем или иным способом в *парообразное состояние*, ионизируются и ускоряются в электрическом поле. Благодаря высокой энергии ионов при их соударении с поверхностью подложки облегчается образование высококачественного покрытия.

Впервые описание процесса ионного осаждения в вакууме появилось в литературе в 1963 г., а первый патент – в 1967 г. Следует отметить, что термин «ионное осаждение» (*ionplating*), введенный Метоксом, не совсем точен, так как при формировании покрытия ионы металла могут и не составлять большую часть конденсирующихся частиц. Поэтому было предложено понимать под ионным осаждением все процессы, в которых поверхность подложки и (или) осаждаемая пленка бомбардируются ионами (металлов, газов), обладающими энергией, достаточной для изменений в структуре и свойствах переходной зоны и самого покрытия.

В англоязычной литературе в последнее время используется следующая терминология процессов нанесения покрытий в вакууме. Основу всех методов физического осаждения (*Physical Vapour Deposition–PVD*) составляют термовакuumное испарение (*evaporation deposition*) и нанесение покрытий в результате ионного распыления (*sputtering deposition*). Процессы реактивного термовакuumного испарения, в которых корпускулярный поток осаждаемых частиц активируется в зоне между источником испаряемого вещества и подложкодержателем, получили название *Activated Reactive Evaporation (ARE)*. Реактивное осаждение покрытий за счет активирования потока осаждаемых частиц, получаемых ионным распылением при энергичной сопутствующей бомбардировке растущей пленки, получили название *Reactive Ion Plating (RIP)*. Приложение потенциала смещения на подложку или воздействие ионным (плазменным) потоком на растущую пленку, например с помощью автономного ионного источника, в процессах ARE относят к методам RIP. Общее название процессов RIP и ARE, включая традиционное ионное распыление, – *Plasma Assisted Physical Vapour Deposition (PAPVD)*. Процессы PAPVD и PACVD (*Plasma Activated (Assisted) Chemical Vapour*

Deposition) имеют общее название *Plasma Assisted Deposition Processes*.

Ионно-термический метод. Сущность ионно-термического метода осаждения покрытий заключается в испарении различными способами материала, ионизации частиц и их ускорении в электрическом поле по направлению к покрываемым деталям и, наконец, конденсации на поверхности последних. Вначале испарение производили с помощью нагревателя сопротивления или индукционным нагревом. Трудности испарения тугоплавких материалов, изменение стехиометрического состава при напылении сплавов и химических соединений и загрязнение покрытий материалом испарителя привели к использованию различных лучевых методов нагрева – электронно-лучевого и лазерного с помощью оптических квантовых генераторов.

Ионизация потока испарившегося материала осуществляется внешним пучком медленных электронов, регулируемым плазменным пучком или в разряде. При испарении лазерным лучом определенной длительности импульса повышенной интенсивности степень ионизации потока достигает 15–20 %. Ионизация паров материала пучком медленных электронов (электронным ударом) при использовании традиционных способов испарения (с помощью нагревателя сопротивления или электронной пушки) позволяет обеспечить степень ионизации 5–10 %.

Степень ионизации атомов испаряемого материала при воздействии плазменного (ионного) потока не выше, чем при ионизации электронным ударом. Однако общая эффективность напылительной системы, оснащенной автономным ионным источником, значительно выше, чем у традиционных ионно-термических систем. Этими преимуществами являются: возможность почти 100 %-ной ионизации реакционноспособного газа, активация синтеза химического соединения на подложке за счет ионной бомбардировки растущей пленки, возможность независимого регулирования металлического и газового потоков, а также степени активации плазмохимической реакции на подложке.

Ионно-термический метод позволяет получать покрытия с высокими служебными характеристиками, дает возможность в широких пределах управлять процессами кристаллизации пленок и их свойствами. В промышленности ионно-термическое осажде-

ние нашло применение для получения износостойких, коррозионно-стойких, оптических, декоративных покрытий как из чистых металлов, так и из соединений.

Основной недостаток ионно-термического метода нанесения покрытий заключается в сравнительно низком проценте ионизированных частиц в общем потоке испаряемого материала, что влияет на адгезионные характеристики покрытия, условия протекания реакции с реакционным газом, скорость роста пленок. Кроме того, применение автономных ионных источников, обеспечивая гибкость, универсальность и эффективность процесса нанесения, значительно усложняет напылительные устройства, особенно при осаждении покрытий на большие поверхности.

Ионное осаждение покрытий магнетронным распылением. Нанесение покрытий в вакууме с помощью магнетронных систем заключается в распылении твердой мишени напыляемого материала ионами инертного газа, образующимися в плазме аномально-го тлеющего разряда при наложении на него магнитного поля, силовые линии которого пересекают ортогонально силовые линии электрического поля.

Магнетронные системы относятся к системам распыления диодного типа, т.е. имеющим два электрода. Высокая скорость распыления достигается увеличением плотности ионного тока за счет локализации плазмы у распыляемой поверхности мишени с помощью сильного поперечного магнитного поля.

Основными элементами устройства (магнетрона) являются катод-мишень, анод и магнитная система. Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы.

При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или нулевой потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки элек-

троны захватываются магнитным полем, им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у поверхности мишени. Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой, с одной стороны, магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой – поверхностью мишени, отталкивающей электроны. Электроны циркулируют в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых электрон потеряет полученную от электрического поля энергию. Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадает на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени. Это в свою очередь обуславливает увеличение интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительный рост скорости осаждения покрытия.

Помимо высокой скорости распыления, магнетронные системы обладают рядом специфических особенностей, основной из которых является отсутствие бомбардировки подложки высокоэнергетичными вторичными электронами, являющимися основным источником нагрева подложек. В магнетронной распылительной системе вторичные электроны захватываются магнитной ловушкой и не бомбардируют подложку, что обеспечивает ей сравнительно низкую температуру. Это позволяет использовать данные системы для нанесения покрытий на подложки из материалов с низкой термостойкостью (пластмассы, полимеры, бумага и т.п.).

Основными рабочими характеристиками магнетронных распылительных систем являются напряжение на электродах, ток разряда, плотность тока на мишени и удельная мощность, величина индукции магнитного поля и рабочее давление. От величины и стабильности перечисленных параметров зависят стабильность разряда и воспроизводимость процесса нанесения покрытий.

Магнетронные системы относятся к низковольтным системам распыления, напряжение питания которых не превышает 1000 В постоянного тока. Рабочее напряжение составляет 300–700 В. На мишень обычно подается отрицательный потенциал, а анод имеет нулевой потенциал. В некоторых системах предусматривается подача отрицательного напряжения смещения на

подложку для реализации распыления со смещением.

Ток разряда зависит от многих факторов, например от рабочего напряжения, рабочего газа и давления, индукции магнитного поля, конфигурации магнетронной системы, распыляемого материала, и определяется мощностью источника питания. Плотность тока на мишени очень велика и в системах с плоским катодом составляет в среднем 200 mA/cm^2 , а значение удельной мощности – 100 Вт/см^2 . Предельно допустимая мощность определяется условиями охлаждения мишени и теплопроводностью распыляемого материала.

Магнетронная система может работать в диапазоне давлений от 10^{-2} до 1 Па и выше. Важнейшими параметрами, во многом определяющими характер разряда в ней, являются геометрия и величина магнитного поля, индукция которого у поверхности мишени 0,03–0,1 Т.

Существует большое число разнообразных конструкций магнетронов, отличающихся способом создания магнитного поля (в некоторых случаях - его конфигурацией), конструкцией катодного узла и геометрией мишени. Разработаны три базовые конструкции магнетрона: цилиндрическая (с цилиндрическим катодом), планарная (с плоским катодом) и так называемая *S-Gun* (с кольцевым конусообразным катодом), которую иногда считают разновидностью цилиндрической. Наиболее эффективна из них планарная магнетронная система.

В данной конструкции магнитная система монтируется в водоохлаждаемом держателе и не вносит загрязнения в камеру. Планарные магнетронные системы позволяют создавать в области распыления высокие плотности тока и достигать скоростей осаждения, сравнимых со скоростями, характерными для методов термического испарения в высоком вакууме. В то же время недостатком такой системы является то, что распылению подвергается узкая кольцеобразная область и коэффициент использования материала составляет около 26 % объема мишени.

Для устранения отмеченного недостатка катодный узел магнетрона может быть усовершенствован путем его дооснащения дополнительным электродом. При этом последний выполняется либо в виде спирали, либо решетчатой формы с радиально расположенными в направлении от периферии к центру отверстиями.

Такая конструкция дополнительного электрода и его базирования между распыляемой мишенью и подложкой позволяет также снизить разогрев обрабатываемых деталей потоком высокоэнергетичных электронов и неравномерность толщины покрытия.

Техника получения покрытий при магнетронном реактивном распылении отмечает большую чувствительность к таким технологическим параметрам, как *плотность ионного тока на мишени, напряжение разряда и отношение парциальных давлений инертного газа к реакционному*. Последний параметр в каждом конкретном случае имеет свое определенное значение и не может иметь одного значения для каждого химического соединения, так как в свою очередь зависит от мощности разряда и от скорости натекания реакционного газа.

Большая чувствительность качества и воспроизводимости свойств покрытий от технологических параметров процесса реактивного распыления и, в частности, от давления реакционного газа и мощности разряда, требует высокой степени контроля процесса напыления от времени. Поэтому получение покрытий стехиометрического состава реактивным магнетронным распылением наиболее эффективно при распылении мишени, полностью покрытой пленкой химического соединения. Однако данный режим характеризуется значительно более низкими скоростями распыления.

Ионное осаждение покрытий из металлической плазмы вакуумного электродугового разряда. В основе ионного осаждения покрытий из металлической плазмы в вакууме лежит процесс генерации металлической плазмы вакуумной дугой – сильноточным низковольтным разрядом, горящим в парах материала электрода.

По способу генерации плазмы вакуумные дуги разделяются на катодную и анодную формы, в которых генерация осуществляется соответственно катодными или анодными пятнами.

На охлаждаемых катоде и аноде (с развитой поверхностью) реализуется катодная форма, развивающаяся в парах материала катода, эродирующего в микропятнах. При катодной форме разряд на аноде диффузно распределен и этот электрод не разрушается. Напряжение в зависимости от материала катода изменяется в пределах 10–30 В. Основную часть разрядного напряжения составляет катодное падение потенциала. В катодных пятнах, число

которых пропорционально току и которые хаотически перемещаются по поверхности катода со скоростью от нескольких десятых до единиц метров в секунду, плотность тока составляет 10^6 – 10^7 А/см при величине тока в пятне от единиц до сотен ампер (в зависимости от материала катода). Необходимая для существования среда образуется в результате испарения материала из области катодных микропятен, в которых плотность потока энергии составляет 10^6 – 10^7 Вт/см².

Для катодной формы существует минимальный критический ток (от единиц до сотен ампер в зависимости от материала катода и параметров электрической цепи), выше которого разряд может гореть устойчиво. Поэтому стационарный катодный режим генерации реализуется устойчиво лишь при токах, больше критического (порогового) (обычно при электрической мощности больше 1 кВт). При меньших средних скоростях генерации используют импульсный катодный режим, в котором величина импульсного тока может существенно превышать критический ток, однако при этом величины усредненных по времени тока, электрической мощности и расхода материала могут быть как угодно малыми и регулироваться в широких пределах изменением частоты следования импульсов.

Продукты эрозии, разлетающиеся приблизительно изотропно в пределах полусферы над поверхностью катода, содержат макрочастицы (капли и твердые осколки материала катода), паровую и ионизированную (ионы с различной кратностью заряда) фазы.

Каждая из составляющих генерируемого потока имеет свое резко отличающееся распределение скоростей. При переходе к более тугоплавким металлам сильно увеличивается доля ионизированной фазы, в основном за счет уменьшения количества капельной фазы. Степень ионизации продуктов эрозии (с учетом кратности заряда ионов) изменяется в пределах от 15 до 80 %, возрастая при переходе к более тугоплавким металлам.

Скорость эрозии катода можно регулировать изменением величины тока разряда.

Эффективными, относительно простыми и реализованными в промышленном исполнении являются *плазменные устройства, основанные на генерации плазмы катодными пятнами*. Метод нанесения покрытий с использованием таких систем получил из-

вестность как метод конденсации металлической плазмы с использованием ионной бомбардировки (метод КИБ).

Технологическая установка, реализующая метод КИБ, представляет собой вакуумную установку, имеющую рабочую камеру со встроенными в нее плазменным испарителем и системой поджига дугового разряда, откачное оборудование, источники электропитания, газовую станцию для подачи рабочего газа в камеру и контрольно-измерительную и управляющую аппаратуру.

Технология нанесения покрытий методом КИБ традиционно включает в себя два этапа: ионную очистку поверхности подложки и конденсацию плазмы. Ионная очистка осуществляется путем катодного распыления поверхностного слоя обрабатываемого материала ионами плазмы вакуумной дуги, ускоренными в дебаевском слое, примыкающем к подложке. В процессе ионной бомбардировки поверхность подложки подвергается интенсивному ионному травлению, удаляются оксиды, загрязнения, сорбированные газы. Одновременно частицы испаряемого материала катода внедряются в подложку и насыщают тонкий поверхностный слой. При этом «залечиваются» поверхностные дефекты и поры.

Обычно ионная очистка производится при достижении в рабочей камере вакуума $((1,33-6,65) \cdot 10^{-3} \text{ Па})$ и подаче на изделие отрицательного потенциала $0,9-1,5 \text{ кВ}$. Величина ионного тока в цепи подложки зависит от тока дуги и составляет $1-2 \text{ А}$. Эффективное распыление материала подложки зависит от величины приложенного к ней напряжения, степени вакуума и материала наносимого покрытия. В области малых энергий ионов преобладает процесс конденсации, с увеличением энергии возрастает роль распыления.

Продолжительность ионной очистки обычно рассчитывают из условия скорости нарастания температуры. Очевидно, что температурный режим изделий различной геометрической формы и выполненных из различных материалов должен отличаться. В связи с этим при отработке технологии нанесения покрытий вопросам определения температуры изделий уделяется значительное внимание.

Процесс конденсации осуществляется обычно непосредственно после очистки поверхности подложки при уменьшении ее потенциала до нескольких десятков вольт ($10-250$). Ток дуго-

вого разряда зависит от материала катода.

Основными технологическими параметрами, определяющими свойства конденсата, являются: химический состав исходного материала (катода), парциальное давление реакционного газа, температура подложки, плотность ионного тока, продолжительность напыления, энергия ионов.

Выше было отмечено, что в продуктах эрозии катода вакуумной дуги наряду с нейтральной и ионизированной компонентами содержится значительное количество макрочастиц в виде капель и твердых осколков материала катода. Применительно к защитно-декоративным покрытиям их отрицательное влияние проявляется в снижении функциональных свойств конденсатов. В связи с этим для исключения попадания указанных составляющих плазменного потока на поверхность конденсации применяют различные методы сепарации плазмы, генерируемой вакуумной дугой.

[Вернуться в оглавление](#)

7.3. Контрольные вопросы

1. В чем заключается метод получения покрытий как катодное распыление (*sputtering*)?
2. Чем характеризуется процесс катодного распыления?
3. Что является важной особенностью катодного распыления?
4. На какие две основные группы можно разделить используемые в настоящее время ионные распылительные системы?
5. По каким признакам классифицируют плазмоионные системы?
6. Когда впервые в литературе появилось описание процесса ионного осаждения в вакууме?
7. В чем сущность ионно-термического метода?
8. К каким технологическим параметрам техника получения покрытий при магнетронном реактивном распылении отмечает большую чувствительность?

[Вернуться в оглавление](#)

ГЛАВА 8. ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

Плазменное напыление – универсальный процесс, позволяющий повысить износостойкость, жаростойкость, коррозионную стойкость и другие эксплуатационные характеристики деталей машин и оборудования.

[Вернуться в оглавление](#)

8.1. Технологические рекомендации по практической реализации процессов напыления плазменных покрытий

Разработан и применяется в производстве ряд технологических процессов плазменного напыления для упрочнения и восстановления конструкционных деталей химического производства, нефтяного оборудования, автотракторной техники, лопаток стационарных газовых турбин и авиационных газотурбинных двигателей.

В общем виде разрабатываемые технологические процессы плазменного напыления можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 8.1.

Установленные механизмы формирования покрытий позволяют рекомендовать наиболее рациональные технологические приемы регулирования их свойств непосредственно в процессе напыления (табл. 8.1). Эти приемы можно разделить на термические и химические, хотя такая классификация условна и подчеркивает главный параметр, по которому ведется управление свойствами покрытия в конкретном процессе его получения.

Типовой технологический процесс плазменного нанесения покрытий из порошков состоит из следующих операций.

1. Подготовка поверхности изделия, подлежащего упрочнению, которая включает в себя предварительную и основную обработку детали. Для этих целей целесообразно применение струйно-абразивной обработки корундом. Более эффективным методом, с точки зрения обеспечения максимальных прочностных свойств покрытия, является активация дуговым разрядом. В процессе струйно-абразивной обработки в месте удара частиц происходит разрушение оксидных пленок с образованием так называемой ювенильной поверхности материала, которая отлича-

ется повышенной активностью. Благодаря этому в глубоком вакууме ювенильные поверхности двух твердых материалов, приведенные в соприкосновение, при небольшом сжатии способны прочно соединяться даже при комнатной температуре.

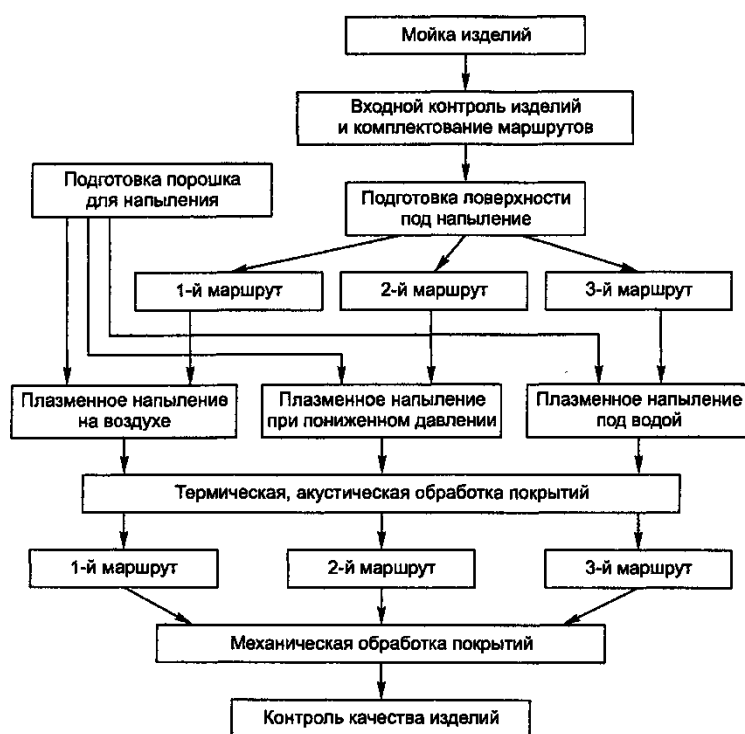


Рис. 8.1. Схема технологического процесса плазменного напыления покрытий

Когда деталь имеет высокую твердость (50–60 HRC и более) или когда она не может быть подвергнута струйно-абразивной или механической обработке по какой-либо другой причине, поверхность детали следует подготавливать к напылению, используя электроискровую обработку. Предпочтительно использование в данном случае в качестве электрода никелевой проволоки. Этот электрод при электроискровом разряде расплавляется электрической дугой и приваривается в виде небольших частичек к поверхности детали. В результате на поверхности образуются небольшие выступы размером 0,1–0,75 мм.

2. Подготовка порошка для напыления заключается в получении требуемого фракционного состава и предварительном подогреве исходных порошков. Размер частиц следует выбирать исходя из теплофизических характеристик порошков и характеристик плазмотронов. В зависимости от химического состава по-

рошка и давления рабочей среды может изменяться в пределах 10–120 мкм его фракционный состав. Для обеспечения равномерной подачи в порошковом дозаторе и хорошей сыпучести порошки хранят в герметичной таре, а перед напылением металлические просушивают (кроме легкоокисляющихся) при температуре 390–420 К, керамические – при температуре 870–970 К.

Таблица 8.1

Технологические приемы регулирования свойств покрытий
в процессе напыления

Термические приемы			Физико-химические приемы	
Повышение энтальпии частиц	Повышение температуры изделия	Изменение теплофизических свойств	Термическое и химическое воздействие плазмы на частицу и под-	Понижение энергии активации взаимодействия
Перегрев частиц	Подогрев изделия	Абразивно-струйная обработка	Очистка поверхности несамостоятельным	Увеличение скорости частиц
Экзотермические реакции в частицах	Подогрев плазмой в пятне напыления	Электроискровая обработка		

3. Нанесение покрытия – основная операция технологического процесса. На свойства и качество покрытия существенное влияние оказывает целый ряд факторов: исходное состояние материалов основания и покрытия, подготовка поверхности и т. д., однако определяющие факторы связаны правильным выбором режимов напыления покрытия. Качественные покрытия при плазменном напылении формируются из частиц, находящихся в расплавленном состоянии. Поэтому главная задача выбора режима напыления – это обеспечение нагрева, плавления и перемещения частиц напыляемого материала к поверхности изделия с минимальными потерями их тепловой и кинетической энергии.

Результаты исследований показывают, что при плазменном

напылении наиболее эффективный нагрев достигается при использовании в качестве плазмообразующих газов водорода, азота, гелия, аргона. Однако стойкость электродов плазменной горелки при работе на водороде мала, поэтому водород целесообразнее использовать в виде добавок (5–10 %) к основному плазмообразующему газу – аргону или азоту. Для нагрева материалов с низкой теплопроводностью необходимо максимально увеличивать время пребывания частиц напыляемого материала в высокотемпературной зоне струи (напыление азотно-водородной плазмой, ввод порошка непосредственно в сопло, в столб дугового разряда, увеличение дистанции напыления). В качестве транспортирующего газа для напыления порошков оксидов в динамическом вакууме целесообразно использовать кислород, а исходный порошок подогревать в порошковом дозаторе до температур 420–570 К.

При нанесении покрытий из порошков металлов и материалов с хорошей теплопроводностью, например карбидов, имеется большая свобода в выборе режима плазменного напыления. Однако и в этом случае предпочтительнее напыление с использованием длинных плазменных струй со сравнительно невысоким градиентом температуры по длине и сечению. В таких условиях испарение и диссоциация материала происходят значительно медленнее, поэтому коэффициент использования материала повышается.

Покрытие, нанесенное неподвижным плазмотроном, имеет форму «горки» с максимальной толщиной в центре, которая уменьшается к краям. Распределение толщины покрытия по сечению «горки» подчиняется, как правило, экспоненциальному закону распределения. В результате линейного перемещения распылителя напыляемый материал осаждается в виде валика. Для получения сплошного покрытия распылителю сообщают поперечную подачу, которая ведет к взаимному наложению соседних валиков. Поэтому напыленный слой можно характеризовать средней толщиной и волнистостью. Волнистость покрытия определяется профилем единичного валика в поперечном сечении и зависит от поперечной подачи распылителя. Если не предъявляются особых требований к волнистости (шероховатости) поверхности покрытий, поперечную подачу следует выбирать равной

примерно $1/3$ ширины единичного валика.

Другой путь повышения эффективности процесса формирования покрытия – увеличение температуры напыляемых частиц. Показано, что прочность сцепления частиц определяется температурой, устанавливающейся в контакте между частицей и основанием, и временем кристаллизации частицы. Увеличивать температуру контакта и время кристаллизации можно как повышением температуры основания, так и перегревом частиц выше температуры плавления. Поэтому, когда местный или общий подогрев изделия недопустим или ограничен невысокой температурой, активировать процесс образования покрытия можно перегревом частиц, используя в данном случае предварительный нагрев порошка в питателе до 420–500 К. Более высокие температуры невозможно реализовать из-за конструктивных особенностей порошкового питателя и термостойкости используемых в конструкции питателя материалов. В таком случае технолог стоит перед дилеммой: какой метод эффективнее – подогрев подложки или перегрев напыляемых частиц? Дать однозначный ответ на этот вопрос достаточно сложно.

Напыляемые частицы, кроме тепловой, получают также кинетическую энергию. Оба вида энергии участвуют в формировании покрытия и определяют его структуру и качество. Если скорость невелика, то главную роль в механизме формирования прочного соединения частиц играют термические процессы. Проведенные исследования показали, что при скорости расплавленных частиц 300–500 м/с можно ожидать их прочного соединения с подложкой без ее предварительного подогрева. Поэтому для плазменного напыления высококачественных покрытий необходима аппаратура, обеспечивающая такую скорость частиц, а также исходный порошок, как можно более узкого фракционного состава, например 15–20 мкм.

Большое влияние на прочность сцепления покрытия оказывает энергетическое состояние напыляемых частиц в момент формирования слоя. Оценка запасенной в частицах энергии производится по их энтальпии, так как она характеризует накопление частицами энергии за счет различных процессов: нагрева, плавления, окисления, фазовых превращений и различных видов химического взаимодействия между материалами, из которых со-

стоят частицы. Наиболее высокую энтальпию[^] при напылении имеют частицы вольфрама и молибдена в расплавленном состоянии. Запасенная частицами этих материалов энергия достаточна для термической активации подложки и обеспечения надежного сцепления покрытия с металлическими подложками без специальной подготовки поверхности, исключая медь и ее сплавы. Однако ни вольфрам, ни молибден не могут быть рекомендованы в качестве покрытия или подслоя для работы при повышенных температурах в активных средах. Они интенсивно окисляются при температурах 570–670 К, а образующиеся сублимирующие оксиды «разрыхляют» защитное покрытие. Одним из перспективных материалов для подслоев при напылении является термореагирующий никель-алюминиевый порошок. При экзотермической реакции энтальпия никель-алюминиевых частиц приближается к энтальпии вольфрама и молибдена.

4. Термическая и акустическая обработка плазменных покрытий включает в себя оплавление газовыми горелками, термодиффузионный отжиг в печах, лазерную обработку и обработку ультразвуком.

Покрытия из самофлюсующихся сплавов следует подвергать оплавлению. Оно приводит к образованию износостойкого и коррозионно-стойкого слоя, по плотности приближающегося к компактному материалу, а по прочности сцепления с основанием достигает уровня 300 МПа. Для оплавления покрытие нагревается до температуры 1270–1370 К.

В мелкосерийном производстве целесообразно использовать оплавление газовой горелкой. Нагрев поверхности детали с покрытием осуществляют в нейтральной или восстановительной среде. Так как нагрев должен быть равномерным со скоростью не более 50 град/мин, то более эффективны в этом случае многосопловые горелки. Желательно подогреть и оплавление осуществлять сразу после нанесения покрытия.

Требования к режимам нагрева и охлаждения деталей до и после оплавления покрытия зависят от марки материала детали, на которую напыляется покрытие. Эти режимы должны учитывать фазовые и структурные превращения в материале основания, а также образование трещин в покрытии из самофлюсующегося сплава. Например, чтобы избежать трещин при оплавлении по-

крытий, нанесенных на углеродистые стали с 0,25–0,4 °С, перед оплавлением необходимо прогреть деталь до 520–640 К, а затем медленно ее охладить. При невозможности использования печного подогрева оплавление желательнее вести двумя горелками. Одной горелкой производится предварительный подогрев напыляемой поверхности, другой – окончательный нагрев до температуры оплавления и окончательного формирования покрытия.

При оплавлении покрытия пламя газовой горелки или струя плазмотрона располагается под углом 30–60° к плоскости нагреваемой поверхности и направляется в сторону холодного участка детали. Момент оплавления покрытия определяется по характерному запотеванию, появлению блеска нагреваемой поверхности. Следует избегать чрезмерного перегрева покрытия, так как это может привести к его отекаанию, снижению твердости, появлению пор, пузырей и усадочных раковин. После оплавления во избежание трещинообразования охлаждение деталей с покрытиями необходимо проводить в емкостях с теплоизоляционными материалами – сухим песком, измельченным асбестом и т. д.

При правильно выполненном оплавлении после завершения операции покрытия имеют характерную гладкую поверхность, повышенную твердость, зеленоватый или золотистый оттенок.

Одним из вариантов интенсификации процесса плазменного напыления является дополнительное акустическое воздействие на плазменную струю с распыляемыми материалами и на формируемое покрытие. Как показано в гл. 7, при этом интенсифицируется теплообмен между частицами в плазменной струе, так как увеличивается коэффициент теплоотдачи за счет турбулизации пограничного слоя и улучшается равномерность нагрева порошка по сечению струи. Акустическое воздействие на жидкую фазу носит объемный характер и позволяет формировать мелкокристаллическую структуру.

5. Механическая обработка покрытий. На заключительных операциях детали с покрытием могут обтачиваться и подвергаться шлифовке. Режимы этих операций следует подбирать такими, чтобы они не привели к повреждению покрытия.

Материал покрытия характеризуется большой пористостью и неоднородностью строения, наличием в нем оксидов и других химических соединений, имеющих весьма высокую твердость.

Поэтому твердость напыленной детали значительно выше исходной заготовки, что приводит при механическом обтачивании деталей с покрытиями к повышенному износу режущей кромки резца. Покрытия имеют также пониженную теплопроводность, которая обусловлена их пористостью и наличием оксидов. Поэтому при обработке резанием покрытия уменьшается естественный теплоотвод, что требует применения эффективных охлаждающих жидкостей. Износ инструмента в процессе обработки может вызывать местные разрушения поверхности покрытия: выкрашивание, отслаивание и появление чешуек.

При шлифовании покрытий происходит быстрое засаливание круга. Пониженная теплопроводность покрытия может приводить к его локальным перегревам. В связи с этим для улучшения обрабатываемости, как и в случае обработки резанием, следует применять жидкости, обладающие эффективным охлаждающим действием. Использование крупнозернистых кругов с более мягкой связкой также повышает их стойкость.

Черновое шлифование керамических покрытий эффективнее осуществлять алмазными кругами, обеспечивающими высокую производительность обработки. Чистовое шлифование лучше выполнять кругами из зеленого корунда или карбида кремния. Чтобы не допускать образования мелких трещин в покрытии, шлифование необходимо производить при подачах, не превышающих 0,025 мм.

Скорость шлифовального круга желательно выбирать равной 25–30 м/с.

6. Контроль качества покрытий является необходимым элементом технологии, обеспечивающим ее надежность в условиях промышленного производства. Многофакторность процесса плазменного напыления обуславливает его чувствительность к отклонениям режимов и повышает значимость контрольных операций.

Существующие методы контроля качества плазменных покрытий следует разделять на неразрушающие и разрушающие. К неразрушающим относятся контроль внешнего вида, измерение толщины и шероховатости поверхности покрытия, определение износостойкости методом царапаний, сквозной пористости покрытий, а также некоторые способы оценки прочности сцепления.

[Вернуться в оглавление](#)

8.2. Технологическое оборудование для плазменного напыления покрытий

В настоящее время в Беларуси на предприятиях различных отраслей промышленности восстановлению и упрочнению подвергается широкая номенклатура деталей машин и оборудования.

Анализ используемых газотермических методов восстановления и упрочнения деталей, выполненный в Научно-исследовательском институте порошковой металлургии (НИИ ПМ) (рис. 8.2) позволяет прогнозировать дальнейшее развитие перспективных технологических процессов газотермической обработки изделий. НИИ ПМ является ведущей научно-исследовательской организацией Беларуси в области плазменных покрытий.

Анализ потребностей предприятий показывает, что в первую очередь существует необходимость в упрочнении восстановлении поверхностей трения деталей сложной формы, таких как детали автомобильных двигателей химического производства, коленчатые валы, оси, вилки, рычаги, галеты, нитераскладчики. Если для формирования защитных слоев на деталях массового производства требуются специализированные линии, то для восстановления единичных деталей наиболее целесообразно применение универсального оборудования.

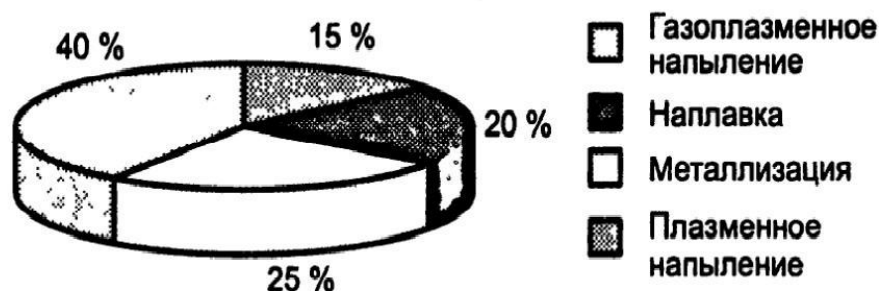


Рис. 8.2. Удельный вес различных методов газотермического упрочнения изделий на предприятиях Беларуси

Оборудование для плазменного нанесения покрытий должно обеспечить выполнение всех основных операций технологического процесса. Для этих целей разработан универ-

сальный механизированный комплекс для плазменного напыления покрытий на детали машин и механизмов, в состав которого входит нестандартное оборудование, разработанное НИИ ПМ с ОП: установка струйно-абразивной обработки; классификатор порошков; порошковый дозатор; проволочный дозатор; плазмотроны (для напыления внутренних и наружных поверхностей); система охлаждения плазмотрона; робот-манипулятор; установка ультразвуковой мойки; вращатель-манипулятор; установка подводного плазменного напыления; система контроля процесса плазменного напыления.

При проектировании комплекса использован модульный принцип. Поэтому комбинирование отдельных установок комплекса с серийно выпускаемым оборудованием позволило создавать на его базе участки и посты для плазменного напыления покрытий.

Для струйно-абразивной обработки (САО) деталей перед напылением в состав комплекса включены установки САО, где детали типа тел вращения длиной до 420 мм и диаметром до 200 мм можно обрабатывать в специальном вращателе с 4-скоростным электрическим приводом. Детали неправильной формы и крупногабаритные обрабатываются на горизонтальной решетке, образованной двумя настилами. Детали типа тел вращения длиной более 420 мм можно обрабатывать во вращателе, используя специальные опоры. В качестве абразивного материала в установке применяется стальная или чугунная колотая дробь с размером зерен 1,2–2,6 мм или электрокорунд с размером зерен 0,4–2,0 мм. Основные технические характеристики установок САО приведены в табл. 8.2.

С помощью классификаторов порошка на производственных участках осуществляется разделение порошковых материалов на фракции, содержащие близкие по размерам частицы. Для этих целей в настоящее время используются серийно выпускаемая установка модели 029 Усманского завода литейного оборудования и воздушный классификатор (табл. 8.3), разработанный НИИ ИМ с ОП.

Таблица 8.2

Основные характеристики установок САО

Характеристика	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Габаритные размеры:			
длина, мм	1100	750	1600
ширина, мм	800	600	800
высота, мм	1890	1600	1900
масса, не более, кг	450	80	650
Питание от сети переменного тока напряжением, В	380/220	380/220	380/220
Потребляемая электрическая мощность, кВт	0,9	0,4	1,2
Рабочее давление воздуха, МПа	0,6 ±0,1	0,6 ±0,1	0,6 ±0,1
Расход сжатого воздуха, м ³ /г	80-120	30-60	60-80
Максимальный диаметр деталей, мм	200	150	450
Режим работы	Ручной	Ручной	Полуавтомат

Таблица 8.3

Технические характеристики воздушного классификатора порошков

Характеристика	Модель 1
Габаритные размеры:	
длина, мм	1000
ширина, мм	570
высота, мм	1700
масса, кг	180
Производительность, кг/ч	25
Количество загружаемого материала, кг	7
Рабочее давление воздуха, МПа	0,11–0,14
Расход воздуха ПО ³ , м ³ /с	0,05–0,20
Минимальный диапазон рассева, мкм	10 ±2,5

В табл. 8.4 указаны характеристики установки для плаз-

менного напыления в атмосферных условиях.

Таблица 8.4

Технические характеристики установок-манипуляторов
для плазменного напыления

Характеристика	Установка
Габаритные размеры:	
длина, мм	1400
ширина, мм	570
высота, мм	1700
масса, кг	360
Питание от сети переменного тока, напряжением, В	380/220
Потребляемая электрическая мощность, кВт	2,2
Скорость вращения детали, об/мин	20–240
Скорость перемещения плазмотрона, мм/мин	120–1100
Максимальный размер деталей, мм	Ø400×250
Длина, мм	450
Диаметр, мм	420
Режим работы	Полуавтоматический

Автономный порошковый питатель. Серийно выпускаемые порошковые питатели плазменных установок не обеспечивают равномерной подачи порошка во времени воспроизведения заданного расхода при их повторном включении. С целью устранения этих недостатков был спроектирован усовершенствованный порошковый питатель (8612.00.00.000), состоящий из трех основных сборочных единиц: собственно порошкового питателя, пульта управления и блока подготовки транспортирующего газа.

Пульт управления служит для включения и регулирования скорости вращения вала электродвигателя.

Блок подготовки транспортирующего газа содержит комплект соединенных между собой по требуемой схеме серийно выпускаемых пневмоаппаратов. Он служит для очистки транспортирующего газа от влаги и масла. На блоке установлены два ротаметра для измерения и регулирования расхода газа. Технические характеристики питателя представлены в табл. 8.5.

По конструктивным особенностям разработанный питатель относится к дозаторам шнекового типа и включает в себя шкаф, загрузочную гильзу с воронкой, шнек, сбрасывающий скребок, привод шнека, вибратор, пневмораспределитель. Напыляемый порошок из воронки сыпается на вращающийся шнек, с него скребком подается в приемный конус, затем транспортирующим газом подается к плазмотрону.

Таблица 8.5

Технические характеристики автономного порошкового питателя

Характеристика	Модель 1
Габаритные размеры:	
длина, мм	570
ширина, мм	570
высота, мм	1500
масса, кг	45
Питание от сети переменного тока напряжением, В	380/220
Отклонение от дозировки порошка, %	±5
Потребляемая электрическая мощность, кВт	1,2
Режим работы	Полуавтоматический

Интегрированный технологический комплекс для плазменного напыления покрытий. Для сокращения времени на технологическую подготовку процессов плазменного напыления покрытий БГУИР совместно с НИИПМ разработал интегрированный комплекс оборудования, позволяющий проводить моделирование, экспериментальные исследования, оптимизацию и практическую реализацию новых технологических процессов. Применение такого комплекса в технологии плазменного напыления позволяет выполнять на одном рабочем месте технолога-исследователя весь комплекс работ, связанных с разработкой новых технологических процессов плазменного напыления изделий различных отраслей промышленности.

Разработка комплекса проводилась с учетом следующих требований:

- возможности моделирования всех стадий процессов

плазменного напыления покрытий в отдельности и в режиме сквозной передачи данных;

- наличия в составе комплекса базы данных свойств веществ, применяемых при плазменном напылении покрытий и их температурных зависимостей;
- возможности экспериментального измерения основных параметров плазменного напыления и ввода их в компьютер в режиме реального времени;
- возможности графической визуализации результатов моделирования и экспериментальных исследований;
- возможности разработки и автоматизированного выпуска комплектов технологической документации на вновь создаваемые технологические процессы плазменного напыления;
- изготовления, согласно разработанной технологии, опытных партий изделий.

С учетом изложенных выше требований разработана обобщенная структурная схема интегрированного комплекса (рис. 8.3).

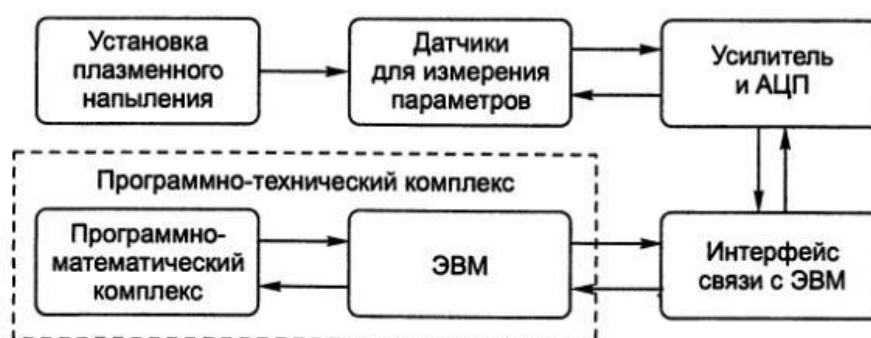


Рис. 8.3. Обобщенная структурная схема интегрированного технологического комплекса

Как видно из рисунка, наиболее важными компонентами комплекса являются измерительные устройства параметров плазменного напыления и интерфейсы связи оборудования с ЭВМ, а также программно-математический комплекс.

Датчики параметров плазменного напыления встраиваются в технологическую линию и обеспечивают выделение необходимого информационного сигнала на фоне помех. Информационные сигналы усиливаются до необходимого уровня и подаются на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для их ввода и даль-

нейшей обработки в программно-математическом комплексе. Для синхронизации работы всей системы должна существовать связь между работой ЭВМ и работой датчиков. Она осуществляется путем синхронизации работы АЦП, который выполняет преобразование только по сигналу от ЭВМ.

Комплекс разработан на основе установки плазменного напыления в вакууме фирмы *Plasmatechnik* (Швейцария) (рис. 8.4). Выбор в качестве основы установки VPS был обусловлен ее более широкими технологическими возможностями по сравнению с технологией напыления в атмосферных условиях (APS), а также значительными технологическими трудностями экспериментального измерения параметров напыления в условиях вакуума или пониженных давлений. Для измерения параметров загруженной и незагруженной плазменной струи в состав комплекса введены оптоэлектронные системы, разработанные совместно ИМАФ НАН Беларуси и НИИ ПМ, которые позволяют проводить измерения температуры, скорости и распределения частиц порошка в плазменной струе.

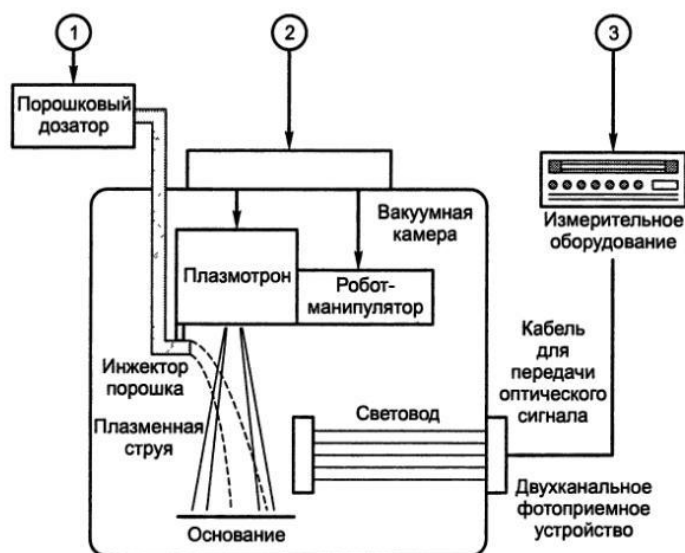


Рис. 8.4. Функциональная схема интегрированного комплекса:
1 – дозатор; 2 – установка; 3 – измерительный комплекс

Измерительная система состоит из чувствительного оптического датчика и устройства детектирования. Оптический датчик предназначен для регистрации и передачи излучения от частиц, пролетающих в поле его зрения, к фотодетектору. Датчик

состоит из оптического волоконного узла, оптической системы и маски в виде двух щелей, расположенных на оси датчика. Массив из 50 волоконных элементов, расположенных в линию, предназначен для определения траектории частиц относительно оси датчика. Оптическая система датчика проецирует изображение пролетающих частиц на оптический узел, который сопрягается с устройством детектирования с помощью световодов.

Принцип работы системы заключается в том, что излучение от пролетающей последовательно через две щели частицы фокусируется оптической системой и попадает в устройство детектирования, которое состоит из двух каналов, работающих в разных спектральных диапазонах. На выходе фотодетекторов получают электрические сигналы, их амплитуда характеризует интенсивность излучения на определенных длинах волн, по которой находится температура нагрева частиц.

Скорость частиц рассчитывается исходя из временного интервала между импульсами и размерами щели, траектории частиц и их распределения в плазменной струе – 50-элементным массивом оптических окончаний с помощью специальной камеры.

В процессе напыления одним каналом световода измеряется температура на поверхности покрытия, температура на обратной стороне напыляемой детали (основания) измеряется с помощью трех термопар, контактирующих с измеряемой поверхностью. Для связи измерительной системы с программно-техническим комплексом применяют быстродействующий модуль и системную магистраль.

Управление процессом напыления осуществляется путем подачи из программно-технического комплекса команд на силовой согласующий блок, который управляет электрическими параметрами плазмотрона (напряжение и сила тока), расходом и составом плазмообразующего газа, дозатором порошка (начальная скорость и расход порошка).

Программное обеспечение комплекса (рис. 8.5) позволяет организовать его работу в различных режимах и содержит следующие основные модули:

- модуль трансляции измеряемых сигналов в истинные значения параметров напыления и их записи в определенном

формате в базу данных;

- база данных свойств веществ, технологических параметров и результатов исследований;
- программно-математический комплекс для моделирования процессов плазменного напыления;
- модуль графической визуализации результатов исследований;
- модуль программного управления процессом напыления;
- модуль автоматизированного оформления и выпуска технологической документации.

Применение разработанного комплекса для отработки новых технологических процессов плазменного напыления позволяет сократить время на технологическую подготовку производства, снизить затраты на материалы и газы, требуемые для проведения исследований, улучшить условия труда инженеров-технологов.



Рис. 8.5. Структура программного обеспечения комплекса

[Вернуться в оглавление](#)

8.3. Новые порошковые материалы для плазменного напыления покрытий и области их применения

Основным недостатком выпускаемых в настоящее время

порошковых материалов для плазменного напыления является отсутствие химических связей между частицами различных материалов композиции. Эти порошки имеют относительно низкий коэффициент использования материала при напылении, для покрытий характерна неоднородность физико-механических свойств и химического состава.

Качественно новый класс порошковых композиционных материалов разработан в НИИ ПМ с ОП. Эти материалы обладают наследственностью физико-механических характеристик в покрытиях, более высоким коэффициентом использования (75–85%) и гомогенностью химического состава как до, так и после напыления, что обусловлено своеобразной структурой материала, формируемой в процессе его изготовления. Так, композиция карбид металла – металлическая связка представляет собой металлическую матрицу с равномерно распределенными в ней зернами карбида. Данная структура позволяет сохранить химический состав карбидов в покрытии таким же, как и в исходном порошке.

Для динамичного развития механообрабатывающего производства важнейшее значение приобретают упрочняющие технологии, позволяющие снизить потребление дорогостоящих легированных сталей и сплавов. Эффективным решением этой проблемы является использование для напыления специально разработанных порошков для антифрикционных покрытий, полученных измельчением стружки цветных металлов, а также улучшение поверхностных свойств деталей узлов механизмов машин, инструмента и оснастки путем нанесения износостойких покрытий в динамическом вакууме и под водой.

Наиболее хорошо зарекомендовали себя разработанные плазменные покрытия для упрочнения и восстановления поверхностей трения деталей сложной формы, таких как детали автомобильных двигателей (вкладыши под подшипники коленчатого вала автомобиля «Татра Т-147», блоки цилиндров автомобильных двигателей, коленчатые валы, оси, вилки, рычаги); детали химического производства (нитепроводящая гарнитура, галеты); детали машиностроительного производства (валы электродвигателей, лопатки стационарных газовых турбин и авиационных газотурбинных двигателей); детали трансформаторов с диэлектрическими покрытиями; пресс-формы для литья пластмасс на основе поли-

карбоната; блоки магнитных головок; валы печатных машин; поршни гидроцилиндров; поддерживающие ролики для конвейеров производства строительных материалов; поддерживающие валы с теплозащитными покрытиями печей по производству автомобильных стекол; вытяжные ролики для производства проволоки; втулки грунтовых насосов, штоки насосов для перекачки пульпы; кольца синхронизаторов коробок передач; блокировочные кольца коробок передач автобуса «Неоплан» и т.д.

Для улучшения эксплуатационных свойств теплоизолирующих покрытий используются промежуточные композиционные слои из металла или металлокерамики.

Плазменная технология широко применяется в настоящее время для восстановления и упрочнения ответственных деталей транспортных средств (табл. 8.6). Совместно с Белорусским автомобильным заводом (г. Жодино) разработана технология упрочнения серийных и восстановления изношенных шкворней поворотного кулака большегрузных автомобилей семейства «БелАЗ» грузоподъемностью 42–180 т (плазменное напыление самофлюсующимся сплавом с последующим оплавлением). Упрочненные таким образом шкворни прошли на заводе стендовые испытания. Разработанная технология внедрена в серийное производство автомобилей. В настоящее время проводятся работы по подготовке к использованию в производстве технологии плазменного напыления более чем для 25 деталей данного семейства автомобилей, которая базируется на применении новейших многокомпонентных материалов.

Разработаны и применяются в производстве технологии плазменного и высокоскоростного газопламенного нанесения покрытий из шнуровых оксидно-керамических и проволочных материалов (металлов и сплавов на их основе, включая медь, цинк, алюминий, молибден, низко- и высокоуглеродистые, нержавеющие стали и др.) для защиты от коррозии, износа, а также для выполнения декоративных, теплопроводящих, термобарьерных, диэлектрических и других функций.

Таблица 8.6

Изделия, восстанавливаемые и упрочняемые методом
плазменного нанесения многокомпонентных покрытий
из порошковых композиционных материалов
для транспортных средств

Наименование изделия	Марка изделия и его принадлежность	Наименование предприятия
Коленчатые валы тяжело нагруженных дизельных двигателей	РАБА-МАН, автобус «Икарус»	Гомельский АРЗ
	М-756, дизель-поезд	Лидское ДРП
	ЯМЗ-240МБ, трактор Т-701	Минский АРЗ
	ЯМЗ 236/238, автомобили семейства МАЗ	ГАП-4, г. Минск
	КАМАЗ-740, автомобили семейства КАМАЗ	ГАП-4, г. Минск
	ЗМЗ-53, грузовые автомобили семейства ГАЗ	Борисовский АРЗ
	ЗМЗ-24, легковые автомобили семейства ГАЗ	Слонимский АРЗ
Распределительные валы	КамаЗ-740, автомобили семейства КАМАЗ	Минский АРЗ
	ЗМЗ-24, легковые автомобили семейства ГАЗ	«Автотаксосервис», г. Минск
Фрикционные кольца	КП-14, автомобили семейства КАМАЗ	Минский АРЗ
Сухари	КП-14, автомобили семейства КАМАЗ	Минский АРЗ
Впускные и выпускные клапаны	ДВС широкого ряда транспортных средств	Хойникский РЗ

Одна из специальных областей применения напыления - изготовление оболочковых деталей из порошков тугоплавких металлов (вольфрам, молибден) и керамики. Плазменное напыление порошков является альтернативным способом изготовления тонкостенных деталей и оказывается экономически выгодным при изготовлении небольших партий изделий.

Этот процесс дает также уникальную возможность изготовления тонкостенных деталей из материалов сложного состава с определенными редкими свойствами с использованием сме-

сей металлических и керамических порошков. Для деталей простой формы напыление выполняется на многократно используемую металлическую или керамическую оправку, покрытую слоем растворимого в воде хлористого натрия, что облегчает снятие детали с оправки путем погружения в воду.

Для деталей сложной формы применяются графитовые оправки, которые обрабатываются на станках, а также оправки из меди или алюминия, которые удаляются с помощью химического травления. Критическим этапом является выбор оптимальной скорости охлаждения, при которой в деталях не образуется усадочных трещин. Фазовые превращения при напылении также могут быть причиной возникновения трещин.

Представляет интерес применение плазменного напыления для изготовления рабочей поверхности формообразующих элементов вставок пресс-форм. Например, на формообразующий элемент вставки пресс-формы нанесен композиционный слой на основе цинка и стали 65Г. Полученное покрытие характеризовалось высокой плотностью. Заливка вставок пресс-форм осуществлялась специально разработанными сплавами.

Во многих случаях покрытия, полученные на воздухе, не обладают достаточной прочностью сцепления с поверхностью детали. В связи с этим разработаны технологические процессы и необходимое аппаратное оснащение для модификации существующих методов, позволяющие улучшить структуру и физико-механические свойства покрытий. Они базируются на использовании защитной атмосферы (аргона), напыления в камерах низкого давления, подводного напыления.

Преимущества напыления при *низком давлении* заключаются в достижении высокой скорости плазмы и струй длиной 40–50 см по сравнению с 4–5 см на воздухе. Значительно снижается также окисление порошков. В этом случае имеется возможность очистки и быстрого подогрева подложек с помощью дополнительной дуги обратной полярности мощностью 8–10 кВт, которая может также использоваться в качестве дополнительного источника энергии для плавления распыляемых тугоплавких порошков.

Однако такой вариант технологического процесса имеет и определенные недостатки. В частности, высокая скорость плазмы низкого давления обеспечивает малое время пребывания в ней

частиц, что связано с проблемой неполного плавления порошков оксидов и других тугоплавких материалов, имеющих большие значения критерия Био. Этому способствует также расширение плазменной струи в вакуумной камере и уменьшение соответственно температуры в центре струи. Поэтому количество тепла, передаваемое от плазмообразующего газа к порошку, меньше, чем при напылении на воздухе, что требует более тщательного подбора параметров напыления, определяющих скорость и траекторию частиц в плазменной струе, повышения мощности плазмотрона.

Одним из перспективных вариантов технологии нанесения покрытий является *подводное плазменное напыление*. Этим методом можно напылять покрытия с достаточно высокой прочностью сцепления (до 45–55 МПа) при использовании порошковых самофлюсующихся материалов.

К его преимуществам можно также отнести отсутствие окисления частиц порошка и напыляемых поверхностей; возможность более интенсивного прогрева напыляемой поверхности без значительного нагрева всей детали ввиду теплоотвода жидкостью; возможность «мокрой» струйно-абразивной подготовки непосредственно перед напылением; более высокую экологическую чистоту ввиду 100 %-ного улавливания порошка и вредных испарений жидкой средой, а также существенное снижение уровня шума.

К недостаткам относятся жесткие требования по гранулометрическому составу исходных порошков, так как эффективно напыляются узкие 40–50 мкм фракции, а также конструктивная и эксплуатационная сложность оборудования.

Следует отметить, что оптимальная дистанция при подводном напылении самофлюсующихся сплавов (мощность плазмотрона 25–35 кВт) составляет 20 мм (при глубине погружения плазмотрона 300–500 мм), что на порядок меньше дистанции напыления в разряженной атмосфере. Установленная особенность объясняется более значительным снижением температуры плазменной струи инжeksiруемым паром. В то же время плазма является более плотной, что обеспечивает более интенсивное проплавление напыляемого материала.

Дальнейшее развитие метода подводного плазменного

напыления покрытий осуществляется в направлении увеличения гидростатического давления окружающей рабочей среды.

[Вернуться в оглавление](#)

8.4. Технико-экономический анализ применения технологий плазменного напыления в промышленности

Технико-экономический анализ технологий плазменного напыления выполнен на примере упрочнения отдельных конструктивных деталей. На стадии разработки и выбора вида технологии для упрочнения деталей проводилось сравнение методов упрочнения не только по их техническим параметрам и достигаемому эффекту повышения защитных свойств, но и по величине затрат на упрочнение. С целью получения сравнительных данных был проведен расчет величины затрат на упрочнение поверхности с использованием традиционных и разработанных технологий при распылении 1 кг порошка. На рис. 8.6 приведены суммарные расходы на напыление 1 кг материала различными методами с учетом всех статей затрат.

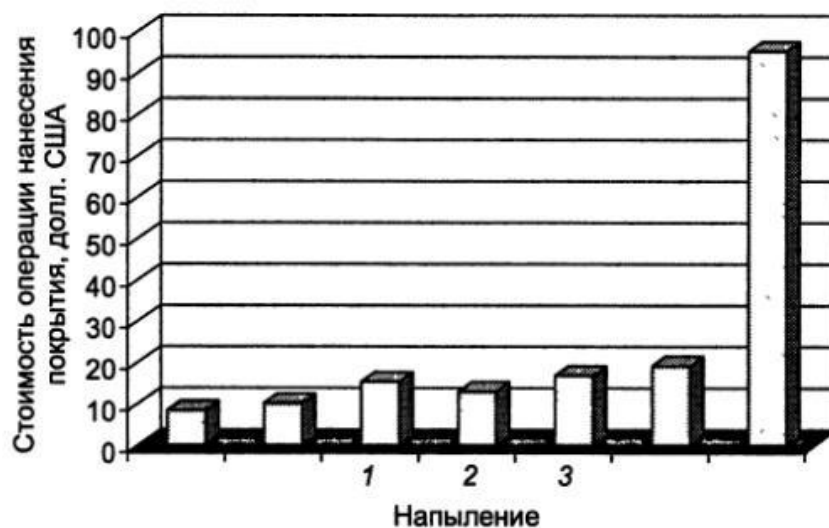


Рис. 8.6. Результаты сопоставления стоимости операции нанесения 1 кг покрытия плазменным методом:
1 – напыление + оплавление горелкой; 2 – напыление + оплавление в печи; 3 – напыление + оплавление

Применение плазменных технологий, конечно же, вносит дополнительные затраты и увеличивает стоимость деталей. Для

обеспечения экономического эффекта этот прирост стоимости должен быть компенсирован в сфере эксплуатации изделия, например увеличением срока службы упрочняемого изделия.

Таким образом, при сроке службы восстановленной детали, равном сроку службы базовой детали, для обеспечения экономической эффективности необходимо, чтобы приведенные затраты на нанесение покрытия были ниже стоимости базовой детали. Опыт применения плазменных технологий показывает, что этот критерий выполняется не во всех случаях.

Поэтому увеличение затрат на плазменное напыление ограничивает номенклатуру деталей, которые экономически целесообразно упрочнять и восстанавливать по этой технологии.

[Вернуться в оглавление](#)

8.5. Перспективные направления развития плазменных методов нанесения защитных покрытий

По имеющимся в научно-технической литературе оценкам в мире с помощью плазменных технологий наносится около 50 % покрытий от общих потребностей. Поэтому перспективным является резкое расширение фундаментальных исследований физико-химического взаимодействия материалов покрытия и основания при напылении, поведения частиц напыляемого материала в высокотемпературных струях. Это позволяет сформулировать ряд положений теории формирования плазменных покрытий, которые обеспечивают переход от чисто эмпирических методов оптимизации режимов напыления к научно обоснованным.

Считается, что основные недостатки плазменных покрытий – плохая связь с подложкой и высокая пористость, в связи с чем этот метод требовал дополнительных операций по уплотнению и совершенствованию структуры покрытий. Однако опыт последних лет по применению для напыления тонкодисперсных порошков размером от 50 до 63 мкм и проведение операций напыления в камерах с защитной средой свидетельствует о том, что можно резко улучшить характеристики плазменных покрытий, в том числе снизить степень шероховатости поверхности и уменьшить пористость защитного слоя до 2–5 %, а использование экзотермически реагирующих порошков для напыления позволяет до-

стичь прочности сцепления 40–50 МПа. Кроме того, применение защитной среды значительно расширило перечень напыляемых материалов, в частности позволило напылять покрытия из титана, тантала, рения, ниобия и других легкоокисляющихся материалов. Металлические покрытия, полученные в этих условиях, отличаются пониженной пористостью и более высокой пластичностью.

Следует отметить, что развитие технологии плазменного напыления в Беларуси, в странах ближнего и дальнего зарубежья связано с решением ряда технических и технологических вопросов и, в частности, с производством порошковых материалов определенного химического и гранулометрического состава, созданием полностью автоматизированных плазменных установок, в том числе работающих в динамическом вакууме, контролируемой атмосфере и под водой.

Перспективными материалами для плазменного напыления, разработанными в НИИ ПМ являются:

1. Спеченный антифрикционный материал на основе меди, который содержит никель, хром, олово, бор, углерод и кремний и дополнительно фосфор, железо и алюминий. Причем олово, фосфор и медь он содержит в виде бронзы марки БрОФ-10-01, а никель, хром, бор, углерод, кремний, алюминий и железо – в виде сложного сплава.

2. Порошковая шихта для спеченных антифрикционных покрытий на основе бронзы. В ней для повышения антифрикционных и физико-механических свойств покрытий дополнительно содержится диселенид вольфрама, фтористый кальций и хромо-никелевый самофлюсующийся сплав.

3. Порошковый керамический материал для газотермического напыления покрытий, содержащий диоксид титана, оксид хрома и оксид алюминия. В этот материал для уменьшения пористости и повышения износостойкости и прочности сцепления покрытий с подложкой дополнительно включен оксид кремния.

4. Материал покрытия для уплотнительных элементов узлов турбин, содержащий нитрид бора и нихром (содержание хрома 19–22 мас. %). В нем для повышения жаростойкости и прочности сцепления покрытия с основанием дополнительно содержится алюминий, молибден и бор.

Важное значение для обеспечения требуемых свойств по-

крытий имеют и способы получения порошковых материалов. В этом отношении перспективным является изготовление композиционного материала на основе алюминия. Этот способ позволяет повысить износостойкость системы оксид хрома – оксид алюминия, оксид алюминия – диоксид титана или оксид циркония – оксид алюминия. Материал изготавливают путем смешивания компонентов шихты с 3–95 мас. % порошкообразного алюминия, термообработку смеси проводят при 1070–1270 К в нейтральной среде в течение 3–5 ч. Затем осуществляют спекание в окислительной среде при 1170–1270 К в течение 4–6 ч. После спекания материал дробят, снова спекают, дробят и отсеивают на фракции. Для увеличения равномерности покрытия по толщине, плотности и прочности сцепления с подложкой, сохранения первоначального химического состава порошкового материала его обрабатывают в атриторе.

Один из путей совершенствования технологии напыления порошковых материалов – использование все расширяющейся номенклатуры порошков металлов, сплавов, оксидов, карбидов, боридов и их смесей для создания специальных по строению, морфологии, структуре и составу композиционных порошков, обеспечивающих формирование покрытий с заранее заданным комплексом свойств.

Выбор наиболее перспективных областей применения защитных покрытий невозможен без комплексного анализа информации о потребностях предприятий в плазменных покрытиях.

Комплексный анализ предполагает классификацию деталей, оценку целесообразности улучшения их характеристик с учетом технологических трудностей процесса, дефицитности оборудования и порошковых материалов, подготовленности работников предприятий и экономической эффективности.

Сокращение сроков внедрения технологии плазменного нанесения защитных покрытий возможно за счет создания банка данных, в котором накапливаются сведения о существующих технологических процессах. Сочетание банка данных о деталях, требующих повышения своих эксплуатационных свойств, с банком данных известных технологий позволит наряду с использованием накопленного опыта для сокращения сроков внедрения определить новые направления исследований.

Применение технологии плазменного напыления покрытий имеет свои особенности.

Во-первых, требуется большое количество нестандартного оборудования. Сложность заключается в том, что выпускается оно в странах СНГ и за рубежом малыми партиями с низкими техническими характеристиками.

Во-вторых, необходимы определенные порошковые материалы, а также некоторые виды сжатого газа.

В-третьих, обслуживающий персонал должен иметь соответствующую квалификацию.

И, наконец, должна быть достаточная номенклатура пригодных для нанесения защитных покрытий деталей, обеспечивающая постоянную загрузку оборудования.

Перспективными отраслями дальнейшего использования плазменных технологий являются химическая, нефтехимическая, нефтяная и текстильная промышленности. Плазменные покрытия в этих отраслях могут применяться для увеличения срока службы быстроизнашивающихся деталей насосов (защитные втулки, торцовые уплотнения, посадочные места). Другой областью применения являются предприятия, изготавливающие детали запорной арматуры, работающие в агрессивных средах и при повышенных температурах, двигатели (защита поршней, цилиндров, компрессионных колец, других деталей газового тракта); авиаремонтные предприятия, а также предприятия сельхозтехники и автотранспорта, на которых требуется восстановление дорогостоящих деталей (например, распределительных и коленчатых валов).

Как отмечалось выше, выбору номенклатуры деталей, подлежащих восстановлению и упрочнению, должен предшествовать анализ технико-экономической эффективности использования технологии плазменного напыления. Предлагается ряд критериев, которыми необходимо руководствоваться при выборе номенклатуры деталей на первом этапе:

- допустимый износ поверхности деталей, подлежащих восстановлению, не должен превышать 1,0–1,5 мм;
- желательно, чтобы плазменное напыление защитного покрытия было окончательным процессом, без последующей обработки покрытия оплавлением, шлифованием и другими трудоем-

кими операциями;

- выбору порошковых материалов для нанесения покрытий должен предшествовать критический анализ условий работы деталей, стоимости материалов для напыления и эксплуатационных возможностей плазменных покрытий;

- особое внимание следует уделять тем деталям, которые при выходе из строя ведут к большим технологическим потерям.

Интенсивные исследования и разработки в области совершенствования технологии и оборудования для плазменного напыления проводятся в нашей стране и за рубежом. В частности, важными направлениями являются разработка новых, более эффективных плазмотронов, улучшение систем подачи порошковых материалов, обеспечение механизации и автоматизации технологических процессов, а также совершенствование условий труда обслуживающего персонала. Созданные конструкции плазмотронов позволяют повысить скорость истекающих плазмообразующих газов, температуру плазменной струи и частиц напыляемого материала, интенсифицировать теплообмен дисперсного материала с высокотемпературной струей, что достигается как конструктивными решениями, так и путем увеличения мощности плазмотронов до 100 кВт и выше. В этом отношении перспективным является применение плазмотронов с осевой подачей порошка, что обеспечивает его более равномерный нагрев и распределение в плазменной струе.

Интенсивно совершенствуется оборудование для напыления в динамическом вакууме или в контролируемой атмосфере. Так, для США и Австрии при плазменном напылении характерно использование камер с инертным газом, где персонал работает в специальных скафандрах.

Для обеспечения стабильности подачи тонкодисперсных порошковых материалов с размером частиц 10 мкм и менее разработаны более совершенные порошковые питатели. В ряде конструкций предусматривается предварительный подогрев транспортирующего газа.

За рубежом защитные покрытия традиционно используются в авиации и ракетостроении. В первую очередь плазменные покрытия наносят на наиболее ответственные детали, несущие вы-

сокие механические и тепловые нагрузки, в частности замки лопаток газовых турбин.

В настоящее время в США более 50 крупных научно-исследовательских центров и лабораторий занимаются разработкой и практическим применением высокотемпературных, в том числе плазменных покрытий.

Дальнейший прогресс во всех отраслях техники зарубежные специалисты связывают с непрерывным развитием, совершенствованием технологий плазменного напыления покрытий различного назначения в большей степени, чем с разработкой новых конструкционных материалов. Поэтому постоянно увеличивается объем производимых порошковых материалов. Западные фирмы поставляют в большом ассортименте специализированные порошковые материалы, гибкие шнуры, проволоку для плазменного напыления. Плазменное напыление с подачей материала в виде гибких шнуров и проволок является перспективным направлением в области создания защитных покрытий. Эта технология обеспечивает увеличение коэффициента использования материала, повышение прочности сцепления покрытия с основанием, так как имеется возможность полного проплавления всего объема распыляемого материала.

Большое внимание ведущими зарубежными фирмами и научными центрами уделяется вопросам автоматизации плазменного оборудования с созданием систем управления качеством напыляемых покрытий. Это достигается за счет применения современных измерительных средств, работающих в реальном режиме времени с организацией обратной связи для подстройки режимов плазменного напыления. Наиболее перспективным является применение для управления процессами плазменного напыления «интеллектуальных систем обработки материалов» (*Intelligent Processing of Materials (IPM)*), которые предусматривают контроль не только основных параметров плазменного напыления, но и свойств получаемых покрытий с выбором наиболее эффективных путей управления данными свойствами. Конечно, это требует глубоких знаний взаимосвязи свойств покрытий с параметрами напыления и обработки информации на основе систем искусственного интеллекта.

[Вернуться в оглавление](#)

8.6. Контрольные вопросы

1. Какие бывают способы получения плазменной струи?
2. Какие бывают виды плазменной струи?
3. В чем заключается обобщенная схема процесса плазменного напыления?
4. Какова скорость плазменной струи?
5. Какие бывают схемы плазменного напыления?
6. В чем заключаются особенности порошкового способа напыления плазменных покрытий.
7. В чем особенности проволочного способа напыления плазменных покрытий?
8. Как классифицируются процессы плазменного напыления по способу защиты?

[Вернуться в оглавление](#)

ЧАСТЬ 2. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

ГЛАВА 9. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

В настоящее время повышению эксплуатационных свойств поверхностных слоев различных деталей машин, приборов и оборудования уделяется повышенное внимание. Создаются новые технологии обработки поверхностных слоев. Внедряются новые материалы, и, соответственно возрастает необходимость контроля качества поверхностей. Вместе с появлением большого числа методов нанесения слоев и обработки поверхности усложнились и требования к средствам диагностики поверхностных слоев (ДПС). Возникла необходимость измерять слои толщиной от нанометров (нанослой) до нескольких миллиметров (плакированные слои), параметры многослойных покрытий, слоев, обработанных концентрированными (лазерными, плазменными) источниками теплоты, диагностировать покрытия из новых материалов (например, графены), свойства покрытий и слоев с разрешением по глубине (например после поверхностной пластической деформации – ППД), выявлять наноразмерные дефекты покрытий и др.

Важнейшими компонентами индустрии обработки поверхности являются методы диагностики поверхностных слоев и покрытий, определение их геометрических, физических и химических характеристик методами НК. Понятно, что ни один метод обработки или нанесения не является полноценным без разработки технологии и средств измерения или оценки всего комплекса свойств слоев и покрытий: толщины; твердости; напряжения; химического состава; оптических характеристик; теплопроводности; шероховатости; сопротивления усталости и износу; наличия дефектов сплошности и др. В арсенале специалистов по диагностике поверхностных слоев (ДПС) сегодня находятся приборы и методы НК: магнитный, вихретоковый, ультразвуковой, радиационный, тепловой, магнитных шумов, СВЧ, оптический, зондовая микроскопия и др.

Насколько известно, одним из первых приборов для контроля покрытий, поставленных на серийное производство, был

магнитный толщиномер Акулова (МТА) (рис. 9.1), основанный на принципе пондеромоторного взаимодействия постоянного магнита и ферромагнитного материала основы. С его помощью можно с точностью до нескольких микрон измерять толщины немагнитных материалов (меди, олова, цинка, хрома, титана) на стали, толщины и свойства ферромагнитных никелевых покрытия на различной основе, содержание ферромагнитной α -фазы в коррозионно-стойкой стали и др. Прибор имел полное метрологическое обеспечение, включая методики аттестации, поверки и измерения, а также комплектовался набором поверочных и контрольных образцов. Несмотря на то, что прибор был запатентован во всем мире и поставлен на производство в 1963 г., до сих пор ни один прибор этого класса не может конкурировать с ним по точности, простоте пользования, надежности и портативности.

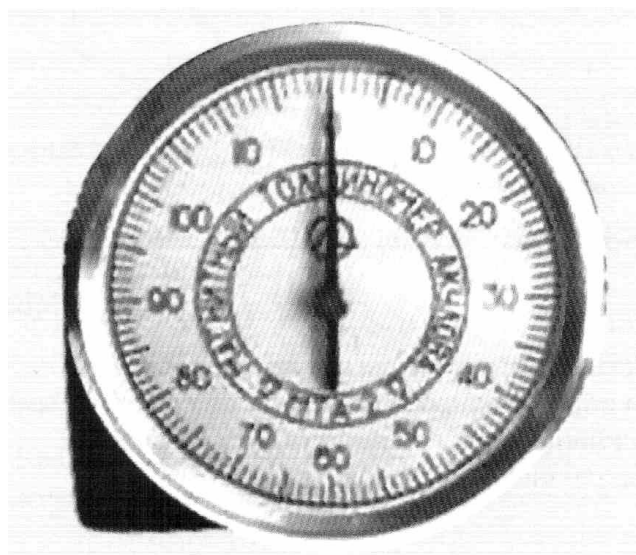


Рис. 9.1. Магнитный толщиномер Акулова

Сегодня предлагается большое количество неразрушающих и малоповреждающих приборов для ДПС и покрытий: вихретоковых, ультразвуковых, магнитных, СВЧ, микрорентгеноспектральных и др. Набор измеряемых параметров обычно ограничен толщиной, твердостью и химическим составом. В данной работе сделана попытка изложить лишь некоторые, с точки зрения автора, значимые тенденции развития ДПС.

[Вернуться в оглавление](#)

9.1. Вихретоковый метод и приборы диагностики

Классификация и основные технические характеристики толщиномеров. Вихретоковые толщиномеры – это приборы для измерения толщины объектов и покрытий на них. Объектами контроля могут быть листы, ленты и фольга из металлов и сплавов, стенки труб и баллонов, детали машин. Еще более разнообразны покрытия. В вихретоковой толщинометрии виды покрытий удобно разделить на следующие группы:

- изоляционные покрытия на электропроводящих основаниях, например лакокрасочные, эмалевые, пластиковые, стеклянные, резиновые покрытия на металлах и сплавах;

- электропроводящие покрытия на изоляционных основаниях, например медные слои на стеклотекстолитовых печатных платах; алюминиевые покрытия на стекле (зеркала) и пластиках;

- электропроводящие покрытия на электропроводящих основаниях, например антикоррозионные слои алюминия на алюминиевых сплавах, нанесенные плакированием (от франц. *plaquer* – покрывать).

Покрытия защищают металлы от коррозии, выполняют теплозащитные, декоративные и другие функции. Среди показателей качества покрытий важнейший – толщина, допускаемые пределы изменения которой определяются нормативно-технической документацией. Разрушающие методы измерения толщины покрытий, например метод микрошлифов, метод взвешивания, травления, не позволяющие реализовать 100%-ный контроль продукции, малопроизводительны и неэкономичны. Поэтому применение вихретоковых толщиномеров для измерения толщины покрытий дает, как правило, значительный технический и экономический эффект. Вихретоковые толщиномеры можно классифицировать по виду ОК и по конструктивному исполнению. По виду ОК выделяют толщиномеры изоляционных покрытий на электропроводящих основаниях, электропроводящих покрытий на изоляционных основаниях и электропроводящих слоев (стенок труб, фольги, лент, листов), электропроводящих покрытий на электропроводящих основаниях.

По конструктивному исполнению различают портативные и переносные толщиномеры.

Технические характеристики вихретоковых толщиномеров определяются ГОСТ 26737-85 «Контроль неразрушающий. Толщиномеры покрытий магнитные и вихретоковые. Общие технические требования». Основная характеристика – предел допускаемой основной погрешности. Он зависит от многих факторов и может быть установлен для любого средства измерения в соответствии с принятыми стандартами. Однако специфика вихретоковых толщиномеров заключается в том, что методическая погрешность определяется в значительной степени свойствами ОК и условиями взаимодействия ВТП и ОК. Если инструментальная погрешность может быть уменьшена до вполне приемлемого значения обычными приемами снижения погрешности средства измерения, то с погрешностью, связанной с ОК, как правило, не удастся справиться так просто. Ее не всегда можно установить достаточно достоверно, поскольку требуются аттестованные образцы толщины покрытий. Их трудно изготовить и аттестовать с погрешностью менее 1 %, а это означает, что погрешность прибора может составлять 3 %, так как по действующим стандартам погрешность образцовых мер должна быть примерно в 3 раза меньше погрешности поверяемого средства измерения. Особенно большие затруднения возникают при аттестации толщиномеров малых толщин покрытий (единицы – десятки микрометров).

Зарубежные фирмы приводят только инструментальную погрешность прибора, причем под нею чаще всего понимается разброс показаний при многократных измерениях. Действующие в России стандарты требуют указания погрешности измерения прибора, включая и случайную составляющую погрешности, которая превышает погрешность инструментальную. Поэтому паспортная погрешность отечественных толщиномеров (около 2...3 %), как правило, больше, чем зарубежных (1 %), хотя это и не всегда отражает истинное положение.

Диапазон измеряемых величин обусловлен назначением толщиномера и характеристиками ОК. Для большинства толщиномеров изоляционного покрытия на проводящем основании он составляет от 5 мкм до 2 мм, а в специальных приборах – до 50 и даже до 400 мм; для толщиномеров электропроводящего слоя – от 0,005 до 2 мм; для толщиномеров проводящих покрытий на проводящем основании – от 0,005 мкм до 0,3 мм.

Диаметром зоны измерения, который может колебаться в широких пределах – от единиц до десятков миллиметров, а в отдельных случаях до нескольких сотен миллиметров, определяется выбор размеров ВТП. Остальные характеристики толщиномеров относятся кообщим для электронных измерительных средств: масса, мощность потребления, показатели надежности, срок службы и др. [Вернуться в оглавление](#)

9.1.1. Толщиномеры изоляционных покрытий на электропроводящих основаниях

Покрытия из изоляционных материалов на металлических основаниях наносят для теплозащиты, защиты от агрессивных сред и атмосферных воздействий, они также выполняют декоративные и другие функции. Материалом покрытия могут служить лак, краска, эмаль, стекло, резина, пластмасса, оксидные и фосфатные слои. Если основание выполнено из ферромагнитных материалов, то эффективнее применять магнитные толщиномеры. Типичные неферромагнитные электропроводящие основания – алюминиевые сплавы, латунь, бронза, медь и др.

Особый случай использования толщиномеров рассматриваемого типа – это измерение толщины изоляционных слоев с помощью так называемых закладных элементов, представляющих собой металлические пластинки или фольгу, закладываемые в технологическом процессе в диэлектрический объект и покрываемые затем слоями диэлектриков, толщину которых необходимо измерять. С помощью этого определяют толщину асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог в процессе строительства и эксплуатации, диэлектрических слоев композиционных материалов, выполненных намоткой из стеклоткани и др.

С точки зрения вихретокового контроля измерение толщины диэлектрика на проводящем основании – задача измерения зазора между накладными ВТП и поверхностью проводящего основания. Поэтому в этом случае целесообразно выбирать значение обобщенного параметра $\beta = R\sqrt{\omega\mu_a\sigma}$ как можно большим. Ограничение значения β сверху определяется наибольшим технически достижимым значением частоты тока возбуждения, поскольку при неиз-

менном радиусе R ВТП увеличить β можно, только увеличивая частоту $f = \omega/2\pi$. Предельное значение f_{\max} следует выбирать так, чтобы оно не менее чем в 2 раза было ниже собственной резонансной частоты f ВТП с соединительным кабелем. Исходя из этих соображений частоту в толщиномерах изоляционного слоя выбирают в пределах 1...20 МГц, при этом обычно $\beta > 20$. При $\beta \gg 20$ чувствительность ВТП к изменениям удельной электрической проводимости мала, поэтому в толщиномерах изоляционного слоя обычно влияние изменений удельной проводимости основания подавляется, а в качестве информативного параметра сигнала ВТП используют модуль вектора (амплитуду) напряжения.

Толщиномеры покрытий можно условно разделить на портативные (рис. 9.2) и переносные. В последнее время приборы этого типа часто выполняют как комбинацию вихретоковых и магнитных толщиномеров. С их помощью можно измерять толщину любых изоляционных покрытий на электропроводящих неферромагнитных основаниях и любых неферромагнитных покрытий (изоляционных и проводящих) на ферромагнитных основаниях.

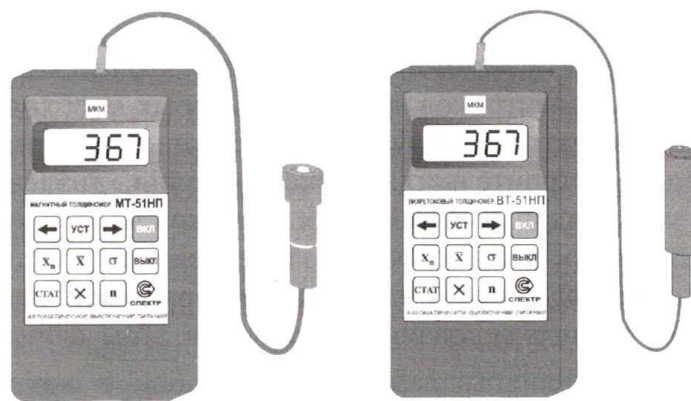


Рис. 9.2. Портативные программируемые толщиномеры покрытий

Существует два основных типа портативных толщиномеров: аналоговые и цифровые, причем цифровые в настоящее время выполняют на основе микропроцессоров.

К достоинствам таких приборов можно отнести:

- портативное исполнение;
- встроенный микропроцессор, за счет чего реализовано кнопочное управление установкой нуля и верхнего предела, упрощающее процесс подготовки прибора к работе;

- конструктивную и схемную унификацию;
- малое энергопотребление;
- комбинированное питание: либо от автономного источника (одна батарейка или аккумулятор), либо от сети 220 В, 50 Гц;
- повышенную стабильность и повторяемость результатов, в том числе и благодаря усовершенствованию конструкции преобразователей;
- повышенную надежность и долговечность прибора вследствие применения электронных комплектующих лучших зарубежных поставщиков;
- возможность статистической обработки информации (среднее значение показаний, среднеквадратическое отклонение, минимальное и максимальное значения; число измерений, номер измерения).

Толщиномеры имеют следующие технические характеристики. Измеряют толщину диэлектрических покрытий (краска, лак, эмаль, пластик) на деталях из немагнитных металлов (алюминий и его сплавы, медь и ее сплавы и т. д.). Предназначены для использования на предприятиях авиационной, автомобильной, судостроительной, электротехнической, машиностроительной и других отраслей промышленности. ВТП выполняется на ферритовом стержне диаметром 1,0 мм и включается в схему автогенератора. Рабочая частота $f = 2$ мГц. Диапазон измеряемых толщин от 5 до 1250 мкм. Приборы могут выпускаться и с другими диапазонами: от 5 до 500 мкм; от 5 мкм до 2 мм; от 5 мкм до 5 мм и т. д. Основная погрешность $(0,03x + 1,0)$ мкм, где x – измеряемое значение толщины покрытия.

Методика настройки толщиномеров весьма проста и сводится к калибровке приборов на образце основы (установка нуля) и на верхнем пределе (мера толщины заданной величины).

[Вернуться в оглавление](#)

9.1.2. Толщиномеры электропроводящих неферромагнитных слоев

Задача измерения толщины электропроводящих слоев возникает при контроле металлических листов, лент, фольги, труб,

баллонов, деталей плоской формы, а также при контроле металлических покрытий на изоляционных основаниях. Следует учитывать, что для измерения толщины металлических объектов с успехом применяют ультразвуковые толщиномеры, обладающие высокой точностью. Так как результаты измерений вихретоковыми толщиномераами принципиально зависят от удельной электрической проводимости материала ОК, а также от зазора между ВТП и ОК, то погрешности вихретоковых толщиномеров обычно больше, чем ультразвуковых. Поэтому вихретоковые толщиномеры электропроводящих слоев оказываются конкурентоспособными при измерении малых толщин (не более 2 мм), а также в тех случаях, когда недопустим акустический контакт (через слой жидкости) преобразователя с ОК.

При измерении толщины электропроводящих слоев можно выделить два основных мешающих фактора: изменения зазора I и удельной электрической проводимости a . Следовательно, это более сложная задача, чем при измерении изоляционных покрытий на проводящих основаниях. Показания большинства приборов не зависят от влияния одного из мешающих факторов, обычно от изменений зазора. Эту независимость реализуют способом проекций либо фазовым способом. Для подавления влияния обоих мешающих факторов применяют двухчастотные способы с использованием амплитудно-фазовых характеристик сигналов на каждой частоте. Следует, однако, иметь в виду, что допустимые диапазоны вариации мешающих факторов обычно невелики.

Для контроля толщины T деталей из алюминиевых сплавов в процессе химического фрезерования применяют фазовые толщиномеры с накладными и экранными накладными ВТП. Так как годографы вносимого напряжения $U_{\text{вн}}(h)$ в некоторой зоне близки пучку лучей и $\arg U_{\text{вн}}(h) \approx \text{const}$, то такие приборы выполняют по схеме фазометра. Частота тока возбуждения ВТП определяется по формуле $f > 2/(\pi\mu_0\sigma T^2)$, получаемой из условия $T*\beta \geq 2$, для обеспечения линейности зависимости фазы вносимого в ВТП напряжения от толщины. Так, для контроля листов из алюминиевых сплавов с $\sigma = 20$ МСм/м и толщиной около 2 мм частота выбирается равной примерно 6 кГц.

Универсальные фазовые толщиномеры могут работать как с накладными, так и с экранными накладными ВТП. При работе с

накладными ВТП диапазон измерения составляет 0,5...4,0 мм; при работе с экранными – 0,5...8,0 мм. Частота тока возбуждения 6,5 кГц для экранных и 1 кГц для накладных ВТП. В основу прибора положена схема фазометра на триггерах. Приборы снабжены набором экранных ВТП с зоной контроля не менее 12×12 мм при допустимом радиусе кривизны ОК не менее 60 мм, а также набором накладных ВТП с зоной контроля не менее 15×15 мм.

Погрешность измерения фазовых толщиномеров не превышает 0,5... 1,0% верхнего предела поддиапазона при использовании экранных и 1,0... 1,5% при использовании накладных ВТП. Дополнительная погрешность при измерении зазора в пределах до 0,5 мм не превышает 0,5% измеряемой величины (для накладных ВТП).

Расстояние между экранными ВТП на 4...5 мм больше максимальной толщины ОК, что необходимо для свободного доступа травящего раствора к поверхности контролируемой детали. Смещение детали в пределах этого зазора между обмотками ВТП не создает дополнительной погрешности.

Для калибровки приборов используют аттестованные по толщине контрольные образцы, по два на каждый поддиапазон (поскольку градуировочная характеристика линейная), выполненные из того же материала, что и ОК. Это означает, что в приборах не подавляется влияние изменений удельной электрической проводимости на результаты измерений.

Еще одна область применения вихретоковых толщиномеров – измерение толщины электропроводящих покрытий на изоляционной основе, например при производстве фольгированных листов из стеклотекстолита, применяемого в качестве основы печатных плат; в зеркальной промышленности при нанесении декоративных металлических покрытий на пластмассы. Особенность задачи измерения толщины тонких (до 150 мкм) электропроводящих покрытий состоит в том, что в этом случае практически невозможно разделить влияние толщины T и удельной проводимости σ на выходной сигнал ВТП и толщиномер реагирует, по существу, на изменение произведения σT . Годографы $U_{вн}(\sigma)$ и $U_{вн}(T)$, сближаясь, принимают форму полуокружности, соответствующей бесконечно тонкому слою. Для измерения толщины медных покрытий на изоляционной основе главным образом для

контроля качества печатных плат используется ряд вихретоковых толщиномеров.

Специфической задачей измерения толщины электропроводящего слоя на изоляционном основании является контроль толщины слоя металлизации отверстий печатных плат. Существует серия вихретоковых измерителей типа ИТМ толщины медного слоя в отверстиях печатных плат. Основой приборов этого типа служит миниатюрный линейный ВТП.

Применение такого ВТП позволяет резко снизить погрешность измерения, связанную с влиянием контактных площадок на результаты измерения. Размещая продольные проводники ВТП равномерно по его поверхности, добиваются снижения погрешности, вызванной влиянием радиальных перемещений ВТП внутри отверстия, поскольку при удалении проводников на одной стороне ВТП от стенки отверстия проводники на диаметрально противоположной стороне приближаются к стенке.

Влияние осевых смещений ВТП относительно печатной платы на результаты измерения устраняется благодаря тому, что длина продольных проводников ВТП превышает максимальную толщину контролируемой печатной платы. Малые размеры ВТП (диаметр 1 мм и менее, длина 3...4 мм) и малое число его витков не позволяют получить значительное начальное напряжение U_0 . Обычно L не превышает 1...4 мВ, а сигналы – десятков, сотен микровольт. Поэтому для устранения влияния подводящих проводов предварительный усилитель сигнала размещен в выносном пробнике прибора (рис. 9.3).

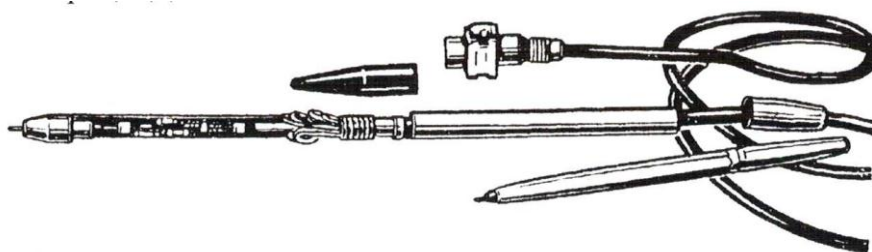


Рис. 9.3. Выносной пробник серии ИТМ со снятым корпусом

Структурная схема толщиномера приведена на рис. 9.4. Генератор (Г), выполненный в виде синтезатора частот, возбуждает ВТП, с выхода которого сигнал поступает на один из входов

дифференциального усилителя (ДУ). На второй вход дифференциального усилителя поступает напряжение той же частоты, регулируемое по амплитуде и фазе компенсатором (К), на вход которого напряжение поступает от генератора. Усиленная дифференциальным услителем разность напряжений ВТП и компенсатора поступает на входы синхронных (фазовых) детекторов, СД1 и СД2.

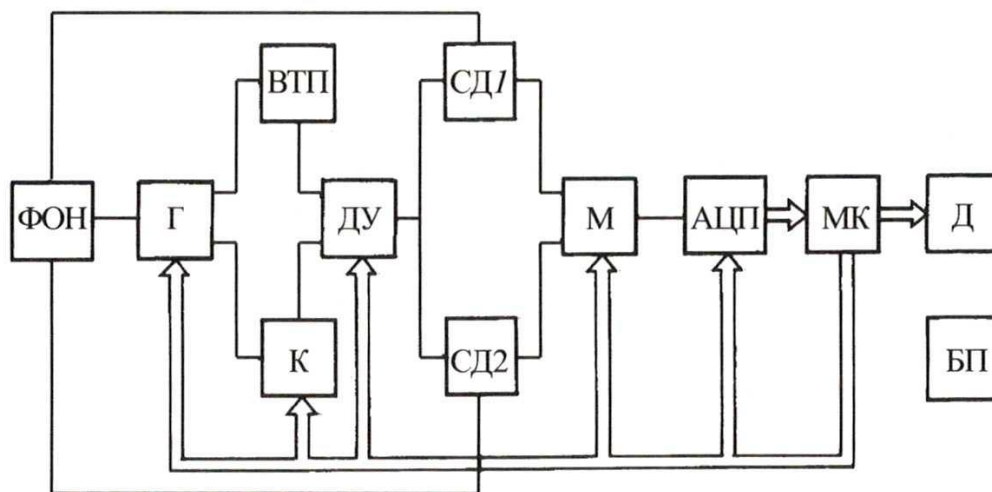


Рис. 9.4 Структурная схема прибора для измерения толщины металлизации

Опорные напряжения синхронных детекторов, созданные формирователем опорных напряжений (ФОН), сдвинуты по фазе на $\pi/2$. Полученные на выходах синхронных детекторов постоянные напряжения, пропорциональные действительной и мнимой составляющим вектора $U_{вн}$, с помощью мультиплексора (М) поочередно подаются на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Цифровые данные с выхода АЦП вводятся в микрокомпьютер и обрабатываются по заданным алгоритмам. Результаты обработки данных отображаются на символьном светодиодном дисплее (Д).

Толщиномер представляет собой портативный прибор, измерительная схема которого выполнена на базе однокристальной микроЭВМ. В приборе измерение толщины медного слоя в отверстии печатной платы осуществляется с отстройкой от влияния диаметра отверстия, учета значения удельной электрической проводимости гальванической меди и толщины печатной платы. Прибор снабжается двумя ВТП: с наружным диаметром 0,78 мм

для контроля отверстий с диаметрами от 0,8 до 2 мм; с наружным диаметром 0,58 мм для контроля отверстий с диаметрами от 0,6 до 0,8 мм. Для удобства замены ВТП выполнены в виде отдельного узла-картриджа, который подключается к выносному пробнику с помощью разъема. Для обеспечения надежности работы ВТП его обмотки помещены в защитную трубку из коррозионно-стойкой стали.

[Вернуться в оглавление](#)

9.1.3. Толщиномеры электропроводящих неферромагнитных покрытий на электропроводящих неферромагнитных основаниях

Этот тип вихретоковых толщиномеров получил наименьшее распространение, что связано с большим разнообразием возможных сочетаний материалов покрытий и оснований, а также с влиянием на результаты измерений по крайней мере трех мешающих факторов: зазора, удельной электрической проводимости покрытия и основания. Кроме того, очевидно, что разность между удельными электрическими проводимостями покрытия и основания должна быть значительной. К покрытиям рассматриваемого типа относятся большинство гальванических покрытий (медь, цинк, олово, серебро, золото, платина и др.) на металлах и сплавах, а также лакирующие покрытия на металлах. Многообразие сочетаний металлов покрытий и оснований приводит к необходимости создания либо узкоспециализированных приборов (рассчитанных на одно-два сочетания), либо средств индивидуальной градуировки прибора в виде серий градуировочных кривых, номограмм, сменных шкал и большого набора контрольных образцов.

Специализированные толщиномеры гальванических покрытий построены по схеме фазометров и предназначены для измерения толщины кадмиевых, цинковых и никелевых покрытий толщиной до 30 мкм или медных и серебряных покрытий толщиной до 50 мкм на деталях из ферромагнитных сталей. Погрешность измерения $5\% \pm 1$ мкм. Допустимое изменение зазора не более 50 мкм, площадь зоны контроля $3,5 \times 3,5$ мм. Для измерения толщины медных и серебряных покрытий на неферромагнитных сталях, серебряных покрытий на латуни и бронзе, хромовых покры-

тий на титановых сплавах применяют приборы с погрешностью измерения $10\% \pm 1,5$ мкм.

В заключение следует отметить, что вихретоковые толщиномеры покрытий практически вне конкуренции при измерении изоляционных покрытий на электропроводящих неферромагнитных основаниях в широком диапазоне толщин покрытий (от единиц микрометров до десятков сантиметров). Они успешно применяются также для измерения толщины электропроводящих неферромагнитных слоев (до 0,2 мм) на изоляционных основаниях. Правда, здесь с ними конкурируют радиационные (радиоизотопные и рентгенофлуоресцентные) толщиномеры, особенно эффективные при контроле покрытий малой толщины (до 30 мкм) на металлических основаниях. При пользовании этими приборами не имеет значения материал покрытия и основания (проводящий или непроводящий, ферро- или неферромагнитный), важно лишь, чтобы атомные номера химических элементов материалов покрытия и основания различались на 1–2 единицы. Недостаток приборов этого типа – большая стоимость (по сравнению с вихретоковыми приборами) и необходимость соблюдения требований радиационной безопасности.

При измерении толщины покрытий на ферромагнитных основаниях или толщины ферромагнитных покрытий (никеля, кобальта) предпочтительнее магнитные толщиномеры.

[Вернуться в оглавление](#)

9.2. Магнитная толщинометрия

Магнитные толщиномеры предназначены для контроля толщины немагнитных покрытий на ферромагнитном основании. В отличие от вихретоковых они позволяют, как правило, одним прибором измерять в равной степени толщину и диэлектрических, и электропроводящих покрытий. По принципу действия все магнитные толщиномеры можно разделить на три группы: 1) толщиномеры пондеромоторного действия; 2) индукционные; 3) магнито-статические.

Пондеромоторный метод основан на регистрации силы отрыва постоянного магнита или сердечника электромагнита от поверхности изделия и на оценке толщины контролируемого покры-

тия по значению этой силы. В первом случае сила определяется при помощи пружинных динамометров, во втором – по изменению тока намагничивания.

Указанный метод положен в основу ряда известных переносных и стационарных толщиномеров, разработанных в нашей стране и за рубежом. Часть этих приборов, особенно стационарного типа, уже потеряла практический интерес, так как в последние годы были разработаны более совершенные устройства.

Из первой группы приборов, сохранивших свое значение и в настоящее время, следует отметить миниатюрные толщиномеры, которые работают по методу прямого отрыва и конструктивно оформлены в виде карандаша. Приборы карандашного типа состоят из небольшого калиброванного магнита с наконечником в форме полусферы. Наконечник соединен с пружиной, расположенной внутри корпуса. С ее помощью измеряется сила, необходимая для отрыва магнита от поверхности контролируемого изделия. Техника измерений заключается в следующем.

Магнит приводят в соприкосновение с покрытием и вращением подвижной части корпуса прибора растягивают пружину до тех пор, пока упругая сила не станет равна силе притяжения магнита изделием. Для определения толщины покрытия показания, соответствующие длине растяжения пружины, переводят в микрометры с помощью номограмм, прилагаемых к каждому прибору. Приборы карандашного типа обеспечивают возможность контроля покрытий с толщиной до 1000 мкм. К существенным недостаткам этих приборов следует отнести субъективную оценку момента отрыва магнита и влияние ориентации толщиномера при контроле. Отклонение его от вертикального положения вносит дополнительную ошибку, так как в этом случае направления веса магнита и силы отрыва не совпадают.

Среди других типов толщиномеров с постоянным магнитом практический интерес представляют малогабаритные толщиномеры рычажного типа, конструкция которых обеспечивает компенсацию веса магнита в любом положении (рис. 9.5). Постоянный магнит с полусферическим наконечником *1* закреплен на одном из плеч коромысла *2*, на другом плече которого установлен противовес *7*. Устройство смонтировано в корпусе *9*, имеющем вид молотка. Прибор снабжен кнопкой *8*, которая выступает из корпуса,

если магнит *1* отрывается от поверхности контролируемого изделия *10*. Спиральная пружина *3* соединяет ось вращения системы *4* через палец *5* со шкалой *6*. Палец, упруго связанный со шкалой, можно поворачивать снаружи с помощью корректора, что позволяет регулировать натяжение спиральной пружины и таким образом устанавливать ноль на шкале прибора. При вращении шкалы пружина натягивается и отрывает магнит от поверхности изделия. Толщина покрытия T_n отсчитывается по видимой части шкалы, проградуированной в микрометрах. Нажатием на кнопку можно вновь осуществить контакт наконечника магнита с изделием и тем самым повторить измерение. Приборы рычажного типа позволяют осуществлять контроль различных немагнитных покрытий, нанесенных на ферромагнитную основу, с толщиной до 10 мм. По сравнению с толщиномерами карандашного типа они обеспечивают более высокую точность измерений, особенно при контроле покрытий на изделиях с плоской поверхностью. Применение этих приборов для измерения толщины покрытий на изделиях сложной формы затруднено.

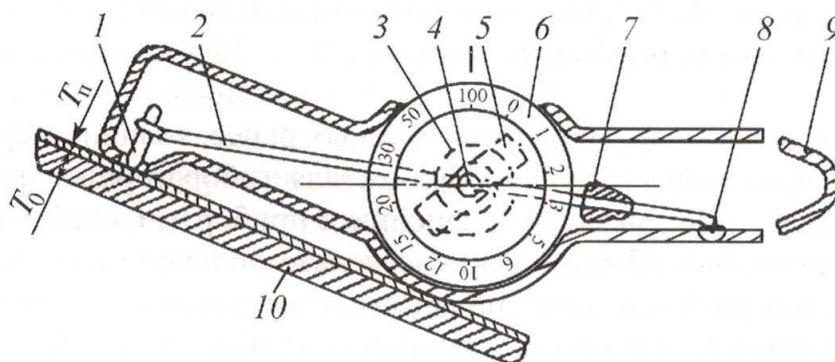


Рис. 9.5. Схема контроля толщины покрытий магнитным толщиномером рычажного типа

К общим недостаткам всех магнитно-отрывных толщиномеров с постоянным магнитом следует прежде всего отнести изнашивание наконечника магнита, которое влияет на градуирование прибора, и загрязнение магнита различными веществами или ферромагнитными опилками. Кроме того, серьезным недостатком является эффект механического прилипания магнита к поверхности, а при контроле мягких покрытий, например лакокрасочных, —

проникновение магнита в покрытие. Необходимо также отметить, что используемые в приборах пружины в процессе эксплуатации изменяют упругие характеристики. Перечисленные факторы могут привести к дополнительным погрешностям измерений, значительно превосходящим значение основной погрешности, предусмотренной техническими условиями на прибор. Это требует тщательной подготовки таких толщиномеров к работе и, при необходимости, своевременного ввода соответствующих поправок.

Рассматриваемые приборы предназначены для измерения толщины немагнитных покрытий в диапазоне 0...120 мкм и никелевых – 0...100 мкм на деталях различных формы и размеров, в том числе и на деталях сложной конфигурации. Применение в толщиномерах МТ-ДАЗ преобразователя с игольчатым сердечником уменьшает влияние свойств материала деталей на результаты измерений, а конусная намотка катушки электромагнита позволяет в значительной степени «спрямить» шкалу прибора в диапазоне 0...30 мкм и повысить точность измерений.

подавляющая часть других, разработанных ранее, толщиномеров с электромагнитами предназначена главным образом для лабораторных измерений толщин в диапазоне 0...200 мкм. По сравнению с приборами, снабженными постоянными магнитами, они обеспечивают несколько большую точность измерений и возможность контроля покрытий на деталях с меньшими размерами и большей кривизной поверхности. Однако они уступают приборам первой группы по диапазону измеряемых толщин, простоте конструкции и удобству эксплуатации.

Широкое распространение получили индукционные толщиномеры, у которых практически все недостатки толщиномеров пндеромоторного действия отсутствуют. Принцип их действия основан на измерении изменений магнитного сопротивления цепи, состоящей из ферромагнитной основы изделия, измерительного преобразователя и немагнитного зазора между ними, соответствующего толщине покрытия.

Индукционный измерительный преобразователь запитывается синусоидальным током. Частота тока, как правило, не превышает 200 Гц. Обобщенная структурная схема толщиномера показана на рис. 9.6.

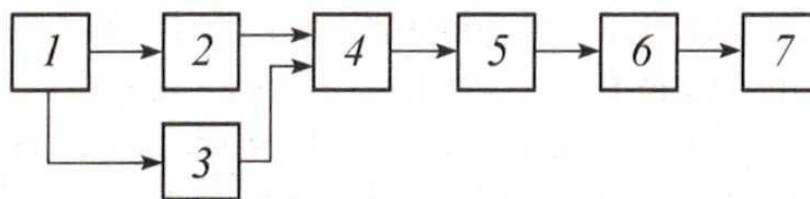


Рис. 9.6. Структурная схема индукционного толщиномера

Автогенератор 1 питает синусоидальным током измерительный преобразователь 2, сигнал которого поступает на вход усилителя 4. Для компенсации начального напряжения измерительного преобразователя 2 используется компенсатор 3, запитываемый, как и преобразователь, от автогенератора. Выходное напряжение компенсатора 3 суммируется с напряжением измерительного преобразователя 2 на входе усилителя 4. Выходное напряжение усилителя с помощью детектора 5 преобразуется в постоянное напряжение, которое поступает в блок обработки сигнала 6, где преобразуется в сигнал, пропорциональный толщине покрытия. Этот сигнал передается в блок индикации 7.

Измерительный преобразователь выполняют в виде одной или нескольких катушек, намотанных на удлиненном сердечнике из ферромагнитного материала. Для уменьшения влияния перекосов преобразователя наконечник сердечника выполняют в форме полусферы.

Для увеличения точности измерений в приборах типа МТ электромагнитное поле локализовано с помощью удлиненного ферромагнитного стержня и шарикового наконечника. Это позволяет измерять толщину в пятне контроля площадью около 1 мм^2 . Краевой эффект проявляется на расстоянии от края детали 3...4 мм. Отклонение оси преобразователя от положения нормали к контролируемой поверхности в пределах 10° не приводит к увеличению погрешности измерений.

В приборах используют накладные преобразователи двух типов:

- 1) для измерения покрытий на деталях небольших размеров с криволинейной поверхностью и сложной конфигурации; конструктивно оформлен в виде шариковой авторучки;
- 2) для измерения покрытий на плоских поверхностях; выполнен в призматическом корпусе и имеет подпружиненный кон-

такт и трехточечную опору.

По сравнению с толщиномерами пьезоэлектрического действия индукционные толщиномеры обладают значительно более высокой точностью измерений (обычно 3% измеряемого значения), процесс измерения в них идет практически непрерывно, что значительно его упрощает и ускоряет.

К третьей группе магнитных толщиномеров относятся магнитостатические толщиномеры. Принцип их действия основан на определении напряженности магнитного поля в зазоре между постоянным магнитом (или электромагнитом) и ферромагнитным материалом основы.

Схема действия магнитостатических толщиномеров с преобразователем Холла приведена на рис. 9.7.

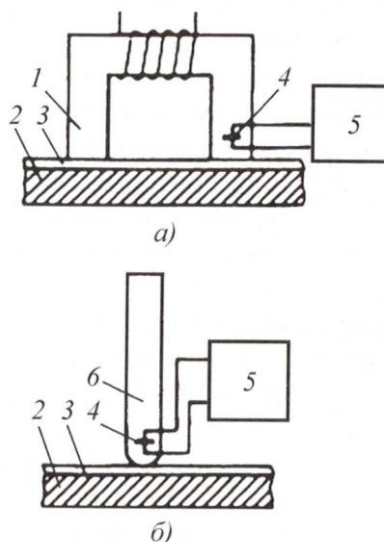


Рис. 9.7. Схемы действия магнитостатических толщиномеров:
а – с П-образным электромагнитом; б – со стержневым постоянным магнитом; 1 – электромагнит; 2 – ферромагнитная деталь; 3 – немагнитное покрытие; 4 – преобразователь Холла; 5 – измерительный прибор; 6 – постоянный магнит

В большинстве современных магнитных толщиномеров используется двухполюсная магнитная система с постоянными стержневыми и П-образными магнитами.

Простейшими приборами такого типа являются толщиномеры, в которых сочетается применение П-образного магнита и механической магнитоуравновешенной системы, расположенной в межполюсном пространстве магнита.

Прибор состоит из П-образного постоянного магнита, имеющего перешеек (параллельную магнитную цепь). В зазоре перешейка смонтирована подвижная магнитная стрелка, жестко связанная с уравнивающей пружиной. При установке прибора на изделие магнитное сопротивление в межполюсном зазоре уменьшается, что вызывает перераспределение магнитного потока в основной и параллельной магнитных цепях. С изменением магнитного потока стрелка прибора поворачивается на угол, пропорциональный толщине измеряемого покрытия.

Приборы этого типа получили достаточно широкое распространение. Однако их используют только для ориентировочной экспресс-оценки толщины покрытия, так как при применении упругой механической системы в сочетании с небольшой по размерам шкалой невозможно получить необходимую точность отсчета в широком диапазоне. Кроме того, при большом расстоянии между полюсами магнита нельзя использовать прибор для контроля малогабаритных деталей.

При всех преимуществах двухполюсных систем, используемых в магнитной толщинометрии покрытий, они имеют недостатки. Системы чувствительны к анизотропии свойств и к шероховатости ферромагнитного основания; кроме того, при их использовании необходимо обеспечивать одинаковый и надежный контакт полюсов преобразователя с контролируемой поверхностью.

Применяют также однополюсные преобразователи со стержневыми магнитами. Для уменьшения потока рассеяния контактирующий с изделием полюс магнита выполняют в виде полусферы из магнитомягкого материала.

Распространенным способом получения информации о толщине покрытия является размещение магниточувствительных элементов либо в магнитной нейтрали, либо непосредственно у полюсов магнита с использованием дифференциального включения магниточувствительных элементов, что обеспечивает работу преобразователя в режиме нулевого начального сигнала.

При работе с магнитными толщиномерами необходимо учитывать многочисленные факторы, влияющие на результаты измерений: колебания магнитных свойств покрытия или основы, состояние поверхности, форму изделия и др. В значительной мере влияние этих факторов обусловлено размерами и формой магнита,

топографией и напряженностью магнитного поля. В связи с возросшими требованиями к точности и надежности производственного контроля толщины покрытий резко возросли требования к их метрологическому обеспечению.

Для измерения толщины покрытий изоляции трубопроводов до 10 мм применяют приборы типа МТП-01 с однополюсными преобразователями на постоянных магнитах с использованием преобразователей Холла (рис. 9.7, б).

Специальная схема питания преобразователя Холла позволяет практически полностью исключить влияние изменений температуры на погрешность измерений. В результате прибор имеет относительную погрешность измерений не более 3 % во всем диапазоне рабочих температур от -10 до $+45$ °С, что даже превосходит по точности индукционные толщиномеры, так как большинство из них имеют дополнительную погрешность измерений, обусловленную изменением температуры окружающей среды.

Наряду с тем, что магнитоэлектрические толщиномеры имеют более простую схемную реализацию и более технологичный в исполнении измерительный преобразователь (отсутствует необходимость намотки катушек), это делает их развитие более перспективным по сравнению с индукционными толщиномерами.

Другим важным преимуществом магнитоэлектрических толщиномеров является отсутствие переменного магнитного поля, создаваемого измерительным преобразователем и приводящего к потерям на вихревые токи при контроле электропроводящих немагнитных покрытий. Обобщенная структурная схема магнитоэлектрического толщиномера приведена на рис. 9.8.

Источник 1 тока питает магниточувствительный измерительный преобразователь 2. В качестве измерительного преобразователя 2 могут использоваться магниторезисторы, преобразователи Холла, феррозонды, рамки с током и другие магниточувствительные элементы. Напряжение с измерительного преобразователя 2 через усилитель постоянного тока 3 поступает в блок обработки сигнала 4, где оно преобразуется в сигнал толщины покрытия. Этот сигнал передается в блок индикации 5.

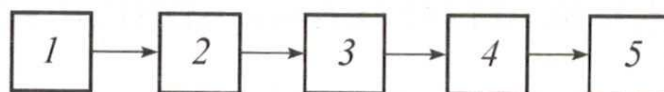


Рис. 9.8. Структурная схема магнитостатического толщиномера

В ряде стран организовано централизованное производство стандартизованных контрольных образцов с разными сочетаниями материалов покрытия и основы. Такие образцы используют при градуировании и поверке магнитных толщиномеров в процессе их разработки и эксплуатации. Тем не менее, огромное число вновь разрабатываемых и применяемых материалов исключает возможность серийного выпуска всей гаммы образцов. Поэтому важнейшей задачей, стоящей перед разработчиками приборов магнитной толщинометрии, является создание безобразцового метода измерения толщины покрытий.

По сравнению с магнитными толщиномерами покрытий значительно меньшее распространение получили магнитные толщиномеры для измерения толщины изделий из ферромагнитных материалов. Это объясняется сложностью создания таких приборов с малой точностью измерений, особенно при измерении больших толщин. Принцип работы магнитных индикаторов толщины типа МИТ-1 с постоянными магнитами основан на считывании изменения магнитных полей рассеяния, вызванного утонением металла. С помощью прибора обнаруживаются коррозионные язвы и места утонения металла, обусловленные коррозионным и эрозионным поражением. Основу составляют П-образный магнит и расположенный между полюсами преобразователь Холла. Основное назначение – контроль трубопроводов, емкостей из ферромагнитных сталей толщиной до 12 мм.

Для измерения толщины стенки ферромагнитных труб в поточном производстве создан магнитный микрометр. Измерения проводят методом магнитного моста, два плеча которого составляют стандартная и контролируемая трубы, два других – сердечник электромагнита. В перемычке моста в качестве измерительного элемента применен феррозонд. Прибор предназначен для измерения труб диаметром 30...102 мм с толщиной стенок 1,5...8 мм. Погрешность измерений составляет 3...4 % при скорости контроля до 2,5 м/с.

[Вернуться в оглавление](#)

9.3. Средства оптической толщинометрии

Приборы оптической толщинометрии по принципу действия подразделяют на оптико-геометрические (триангуляционные, фокусируемые, светового сечения), спектрофотометрические, а также интерферометры и эллипсометры. Они аналогичны соответствующим приборам контроля геометрии, описанным выше. Отличаются наличием второго измерительного канала, т.е. в использовании двухстороннего способа измерения.

Действие спектрофотометрических толщиномеров основано на законе Бугера

$$D_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}}{I_{0\lambda}} = kl,$$

где D_{λ} – оптическая плотность прозрачного объекта; I_{λ} и $I_{0\lambda}$ – спектральные интенсивности излучения до и после прохождения объекта толщиной l , мм; k – коэффициент спектральной абсорбции (поглощения) материала изделия, мм^{-1} .

Обычно выбирают область длин волн, соответствующих резонансному поглощению света (полосы поглощения) в материале. Для многих полимеров (полиэтилен, полипропилен и др.) характерна, например, линия поглощения на $\lambda = 2,35$ мкм. В приборе используют два сменных фильтра – один соответствует полосе поглощения, другой – области длин, где поглощение мало зависит от толщины пленки. Измеряя отношение сигналов, корректируют мультипликативную погрешность вследствие неселективного ослабления света в пленке, например из-за наличия рассеивающих включений.

В режиме на отражение в дальнем ИК-диапазоне возможно измерение толщины коррозионных фосфатных покрытий на листах металла для автомобильной и других отраслей.

Лазерная эллипсометрия основана на анализе изменения состояния поляризации света, отраженного от поверхности изделия. Метод позволяет контролировать с высокой точностью толщины ($10^{-2} \dots 2 \cdot 10^{-7}$ мм) и показатели преломления (до 10^{-5}). Применение лазеров позволило резко повысить чувствительность и информа-

тивность эллипсометрического метода, так как они определяются главным образом монохроматичностью и степенью направленности источника излучения.

На контролируемый объект направляют под некоторым углом i_0 монохроматический плоскополяризованный луч. Вектор амплитуды электрического поля может быть разложен на составляющие E_p и E_s , ориентированные соответственно параллельно и нормально к плоскости падения. После отражения (или прохождения) луча от объекта его составляющие изменяют свою амплитуду и фазу и он становится эллиптически поляризованным, т.е. конец его описывает эллипс в плоскости, нормальной к направлению распространения.

Для наиболее часто встречающихся на практике случаев прозрачной диэлектрической пленки на поверхности полупроводника степень этой эллиптичности ρ является функцией толщины пленки d_1 , показателей преломления пленки и подложки n_1 и n_2 , показателя поглощения подложки α_2 , длины волны лазера λ , угла падения луча на образец i_0 , т.е.

$$\rho = \rho(n_1, n_2, \alpha_2, d_1, \lambda, i_0).$$

[Вернуться в оглавление](#)

9.4. СВЧ-толщинометрия

Методы СВЧ-толщинометрии используются для контроля толщины диэлектрических покрытий на любой металлической основе, на диэлектрической основе (при разнице диэлектрических свойств основы и покрытия), для толщинометрии диэлектрических слоев и металлических листов и проката. В практике неразрушающего контроля толщины наибольшее применение нашли методы: геометрический, амплитудно-фазовый, частотно-фазовый и поляризационный (эллипсометрический).

[Вернуться в оглавление](#)

9.4.1. Геометрический метод

Если направить оптическую ось радиоволнового пучка, совпадающую с максимумом распределения интенсивности в поперечном сечении, под углом θ к нормали поверхности плоского диэлектрического слоя толщиной h , то расстояние между точками «входа» пучка и «выхода» равно

$$l' = 2 \int_0^h \frac{\sin \theta}{(n_2^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} dz,$$

где n_2 – показатель преломления вещества слоя в выбранном диапазоне рабочих длин волн, а ось z совпадает с нормалью к поверхности слоя. Определяя наикратчайшее расстояние между отраженными от границ слоя пучками как $l = l' \cos \theta$, найдем, что

$$h = \frac{1}{\sin^2 \theta} (n_2^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}.$$

В геометрическом методе информация о толщине содержится в геометрическом параметре 1. Если, используя контактные призмы из того же материала, вводить пучок в слой без преломления, а угол θ выбрать равным $\arctg 0,5$, то получим $h = 1$.

Однако чем больше поперечные размеры применяемых пучков, чем больше их угловая расходимость, а также чем меньше при этом толщина диэлектрического слоя, тем сильнее проявляется взаимодействие отраженных пучков, приводящее к амплитудно-фазовым искажениям за счет интерференции в пространстве взаимодействия. Эти искажения приводят к значительной погрешности фиксации максимума отраженного от задней границы раздела пучка и, следовательно, к снижению точности определения толщины геометрическим методом. Для устранения этого явления используется согласование граничащих сред. Согласующий слой увеличивает прозрачность передней границы раздела и, частично или полностью устраняя первый отраженный пучок, приводит к повышению точности измерений, чувствительности контроля толщины. При параллельной (вертикальной) поляризации согла-

сование сохраняется практически в области углов падения от 0 до 50°, что очень важно при использовании расходящихся радиоволновых пучков.

Точность геометрического метода зависит от следующих трех основных источников погрешности: изменения диэлектрических свойств материала слоя, ошибки измерения смещения максимума отраженного пучка и ошибки измерения угла падения первичного пучка.

Если инструментальную погрешность геометрического метода свести к нулю, то получим предельную относительную точность определения толщины, равную относительному изменению среднего значения показателя преломления измеряемой среды, т.е.

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta n}{n}$$

Для снижения инструментальной ошибки должны быть выполнены следующие условия: сужение падающего радиоволнового пучка, обеспечение большей направленности приемной антенны при возможно меньшей площади раскрыва, а также уменьшение длины датчиков и зазора между ними и контролируемым слоем.

Реально достижимая относительная точность определения толщины геометрическим методом для сравнительно однородных диэлектрических сред лежит в пределах 3...5 %.

Критерием оценки пригодности антенн для геометрического метода стали параметры: начальные размеры пучка, определяемые геометрическими размерами раскрыва; угол расходимости пучка; площадь поперечного сечения пучка на определенном расстоянии от раскрыва; форма распределения интенсивности в плоскости поперечного сечения.

Учитывая основные достоинства и недостатки различных типов антенн, а также их параметры в ближней и дальней зонах, для измерений тонких слоев на близких расстояниях рекомендованы открытые срезы волноводов, при больших толщинах и на больших расстояниях – рупорно-линзовые антенны, а для решения «промежуточных задач» целесообразно использовать излучатели в виде диэлектрических стрежневых антенн. При этом незначительный уровень боковых и паразитной связи через открытое пространство при их близком расположении также указывает на пер-

спективность использования антенн в виде диэлектрических стержней для реализации геометрического метода.

Экспериментальная проверка геометрического метода производилась в трехсантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн. Блок-схема реализации геометрического метода измерения толщины приведена на рис. 9.9, а диаграмма записи отраженных от плоского слоя пучков на рис. 9.10.

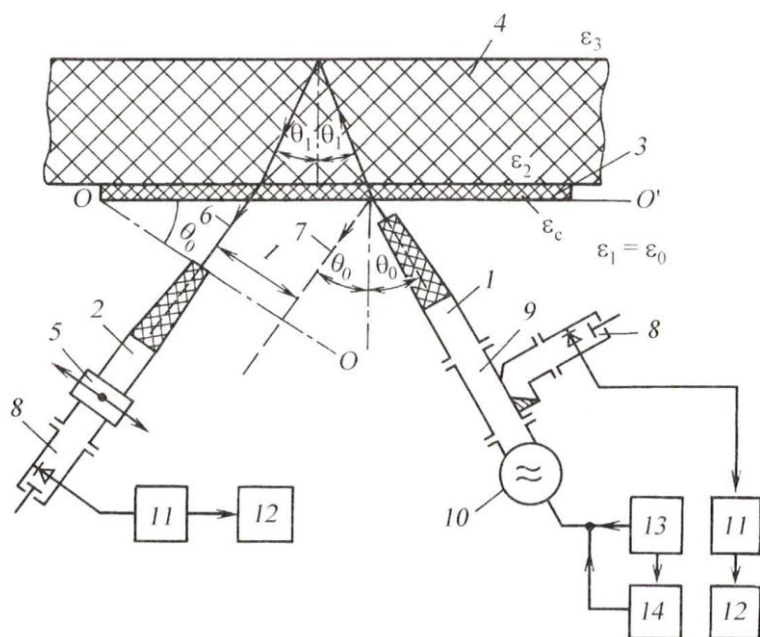


Рис. 9.9. Блок-схема геометрического метода измерений толщины:
 1 – передающая антенна (излучатель); 2 – приемно-индикаторная антенна;
 3 – согласующая диэлектрическая пластина; 4 – контролируемый слой;
 5 – механизм перемещения приемно-индикаторной антенны; 6 – оптическая ось пучка, отраженного от задней поверхности слоя; 7 – то же, но от передней поверхности без согласующей пластины; 8 – детекторная секция; 9 – направленный ответвитель; 10 – генератор СВЧ; 11 – усилитель НЧ; 12 – индикатор; 13 – источник питания; 14 – модулятор

Геометрический метод является абсолютным методом, позволяя контролировать толщину плоских слоев практически от нуля до значений, ограничиваемых заложенным в аппаратуре динамическим энергетическим диапазоном. Метод реализован в приборах, предназначенных для контроля толщины огнеупорных футеровок действующих стекловаренных печей.

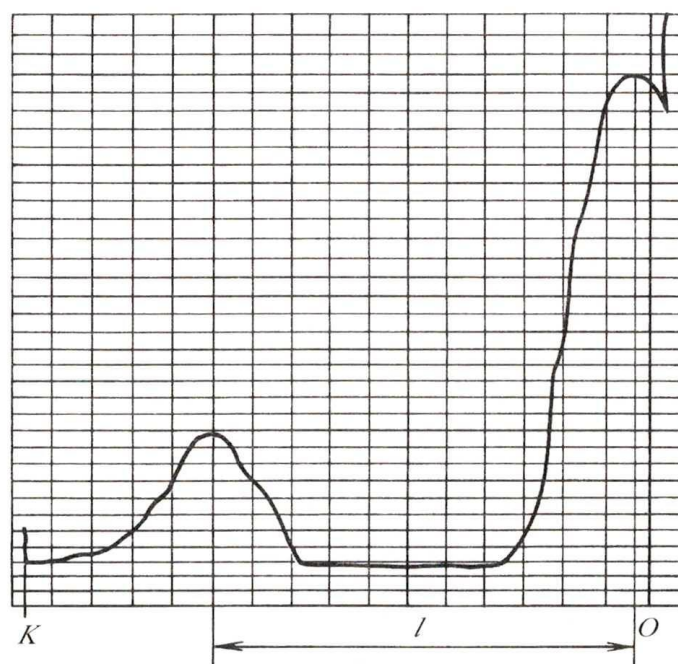


Рис. 9.10. Диаграмма записи отраженных от плоского слоя пучков (полистирол толщиной 141 мм):
 $i_p = 93$ мм; $l_3 = 96$ мм; $\delta_n = + 3,2\%$

Практически полученная точность определения толщины $\pm 10...15\%$ объясняется существенными изменениями в структуре огнеупоров, что приводит, соответственно, к непостоянству показателя преломления n_2 . Геометрический метод позволяет также измерить толщину слоя, не зная показателя преломления, если задать разные углы падения θ_1 и θ_2 . В результате имеем

[Вернуться в оглавление](#)

9.4.2. Амплитудно-фазовый метод

В амплитудно-фазовом методе используется функциональная связь между коэффициентом отражения от диэлектрического слоя и его толщиной. Контроль изменения величины коэффициента отражения, как правило, производится с помощью введения дополнительного опорного сигнала той же длины волны. Поэтому, применяя высокочувствительные мостовые СВЧ-схемы, осуществляющие одновременный контроль модуля и фазы коэффициента отражения, несущих информацию об изменении толщины слоя.

В общем виде амплитудно-фазовый метод является относительным. Измерение толщины может достоверно с высокой чув-

ствительностью производиться в пределах линейного участка осциллирующей кривой, а также при условии априорного знания области измеряемых толщин. Предел однозначности измерений отвечает условию

$$h \text{ (или } \Delta h) \leq \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\varepsilon_2}}.$$

Для устранения неоднозначности контроля применяют следующие способы:

- непрерывное измерение коэффициента отражения и счет числа максимумов (минимумов) результирующей интерференционной кривой;
- использование двух рабочих длин волн, на одной из которых толщина определяется грубо, а на другой – более точно;
- применение фазовой модуляции полезного сигнала с целью определения крутизны линейного участка интерференционной кривой.

Точность измерений амплитудно-фазовым методом может быть весьма высокой, но не выше предела, обусловленного относительной величиной разброса диэлектрических свойств материала слоя, выраженной через отношение $\Delta n_2/n_2$. Относительная погрешность измерений толщины для достаточно однородных диэлектриков составляет 1...3 %. Переходя к абсолютным величинам, это будет 59...199 мкм на длине волны 3 см и 29...39 мкм в восьмимиллиметровом диапазоне. Амплитудно-фазовый метод реализован в ряде СВЧ-толщиномеров: для контроля теплозащитных покрытий толщиной 2...16 мм на металлических корпусах с погрешностью $\pm 9,1$ мм на частоте 9,3 ГГц; для контроля разнотолщинности теплозащитного покрытия на стеклопластиковых корпусах; для контроля толщины стеклянных полотен при производстве технического стекла.

На рис. 9.11 показана типичная зависимость выходного сигнала амплитудно-фазового СВЧ-толщиномера.

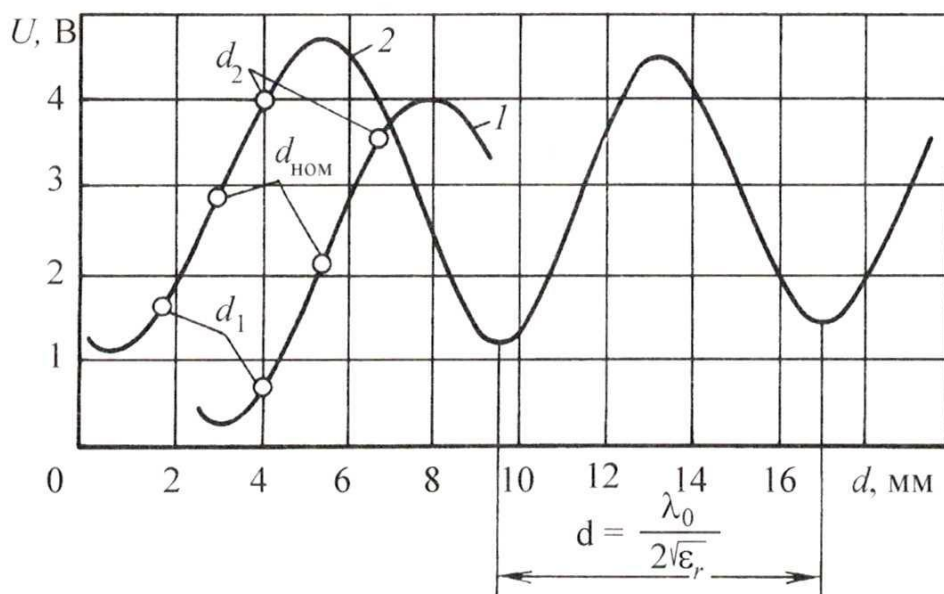


Рис. 9.11. Зависимость выходного сигнала от толщины ОК:
 $d_{\text{НОМ}}$ – номинальная толщина ОК в диапазоне толщин $d_1 \dots d_2$;
 кривые 1 и 2 соответствуют различным зазорам между антенной и ОК

Приборы выполнены на трехсантиметровом ГЛПД. Принцип действия приборов основан на сравнении в мостовой схеме (на двойном волноводном тройнике) двух сигналов: опорного, создаваемого образцовым плечом моста, и измеряемого, пропорционального коэффициенту отражения от контролируемого диэлектрического слоя.

Приборы показали также хорошие результаты при контроле толщины антикоррозионных покрытий в заводских условиях нефтегазовых стальных труб большого диаметра.

Другой тип амплитудно-фазового СВЧ-толщиномера выполнен на восьмимиллиметровом генераторе Ганна и предназначен для измерения толщины тонких диэлектрических покрытий на диэлектрической основе. На рис. 9.12 приведена оригинальная часть прибора. Излучающая и приемная антенны опираются на грани диэлектрической призмы W_4 , обращенной вершиной к ОК. Призма служит концентратором энергии, в результате улучшается локальность контроля. Диапазон измеряемых толщин 0,15...0,5 мм, основная погрешность $\pm 0,02$ мм, минимальное расстояние зоны контроля от края объекта не более 10 мм, масса преобразователя 0,5 кг.

Разновидностью амплитудно-фазового метода является СВЧ-

импедансный метод контроля толщины и удельного сопротивления полупроводниковых, эпитаксиальных и диффузионных слоев, например полупроводниковых пластин толщиной 300...2000 мкм и диаметром 30...40 мм, германиевых пластин с эпитаксиальными слоями 0...300 мкм, кремниевых пластин с диффузионными слоями 25...50 мкм и др. Удельное сопротивление находится в пределах $10^{-4} \dots 10^{-2}$ Ом · м. Входной импеданс структур, как правило, измеряется через фазу и минимум амплитуды стоячей волны с помощью измерительной линии. Контроль параметров полупроводниковых структур производится однопараметровым и двухпараметровым способами, при этом погрешность контроля толщины на длине волны 7,5 мм не превышает $\pm 15\%$.

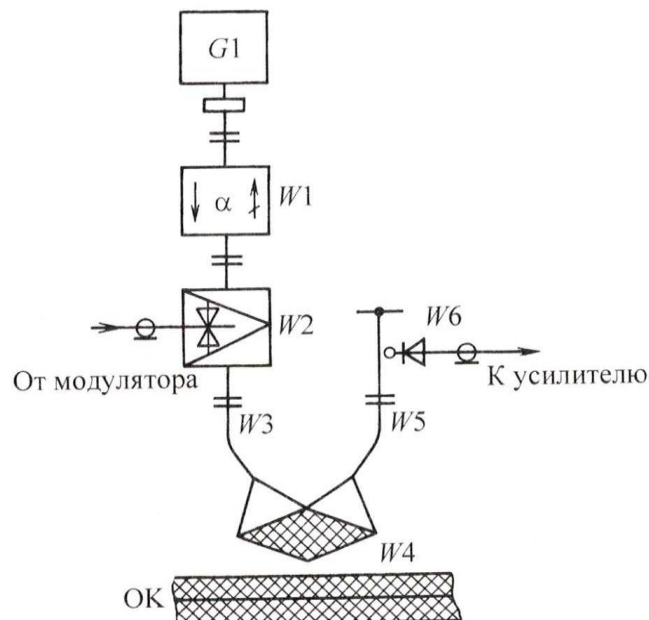


Рис. 9.12. Схема преобразователя прибора:

$G1$ – генератор; $W1$ – вентиль; $W2$ – электрически управляемый аттенюатор;
 $W3$ и $W5$ – соответственно передающая и приемная антенна;
 $W4$ – диэлектрическая призма; $W6$ – детекторная секция

При реализации амплитудно-фазового метода наибольшее распространение получили схемы с двойным Т-образным волновым тройником. Основной принцип получения информации заключается в следующем. В одно из H -плеч тройника поступает энергия СВЧ, которая делится пополам между измерительным и опорным плечами. В измерительное плечо подключается приемно-передающая антенна, а в опорное – переменный аттенюатор и

короткозамыкающий поршень для регулировки амплитуды и фазы опорной волны. Волны, отраженные от конца опорного плеча и объекта контроля, взаимодействуют в плече E , в результате чего происходит их сравнение по амплитуде и фазе. При номинальной измеряемой толщине h проводят балансировку прибора таким образом, чтобы в плече E сигнал отсутствовал. Отклонение толщины от номинала приводит к разбалансу схемы и появлению сигнала, пропорционального изменению толщины.

На точность измерения толщины влияют следующие факторы: состояние поверхности, однородность свойств материала по объему, стабильность работы аппаратуры, изменение положения зазора и угла датчика относительного образца, уровень развязки плеч двойного тройника и условия согласования с передней поверхностью.

Абсолютные значения толщины в большом диапазоне ее изменений можно получить при таком смещении интерференционной кривой, чтобы в районе измеряемых толщин находился линейный участок. Этого можно достичь с помощью перестройки частоты генератора, изменения расстояния (зазора) между антенной и поверхностью образца, изменения «электрической» длины опорного плеча фазовращателем.

На рис. 9.13 приведены интерференционные кривые, снятые для материала, находящегося на металлической подложке. Из анализа этих кривых следует, что, подбирая определенную величину зазора, можно перекрыть весь диапазон изменения толщин от 2 до 16 мм. Для обеспечения высокой точности антенна должна иметь большой коэффициент направленности, малые боковые лепестки, лучшее согласование.

Наилучшие результаты получают с помощью рупорных антенн или круглых волноводов малого диаметра с диэлектрической вставкой. При развязке плеч E и H порядка 60 дБ на фиксированной длине волны схема оказывается чувствительной к относительному изменению коэффициента отражения как по амплитуде, так и по фазе. Это позволяет получить точность измерения порядка 5...50 мкм в зависимости от рабочей длины волны. Для измерений толщины диэлектрика на подложке диэлектрическая проницаемость подложки (для обеспечения точностных характеристик прибора) должна быть не менее чем в 1,5 раза больше или меньше

диэлектрической проницаемости материала покрытия. Толщина диэлектрической подложки не должна меняться более чем на половину погрешности измерений. Допустимый минимальный диаметр контролируемых приборами цилиндрических изделий с учетом градуировки индикатора на криволинейных контрольных образцах составляет примерно 50 мм.

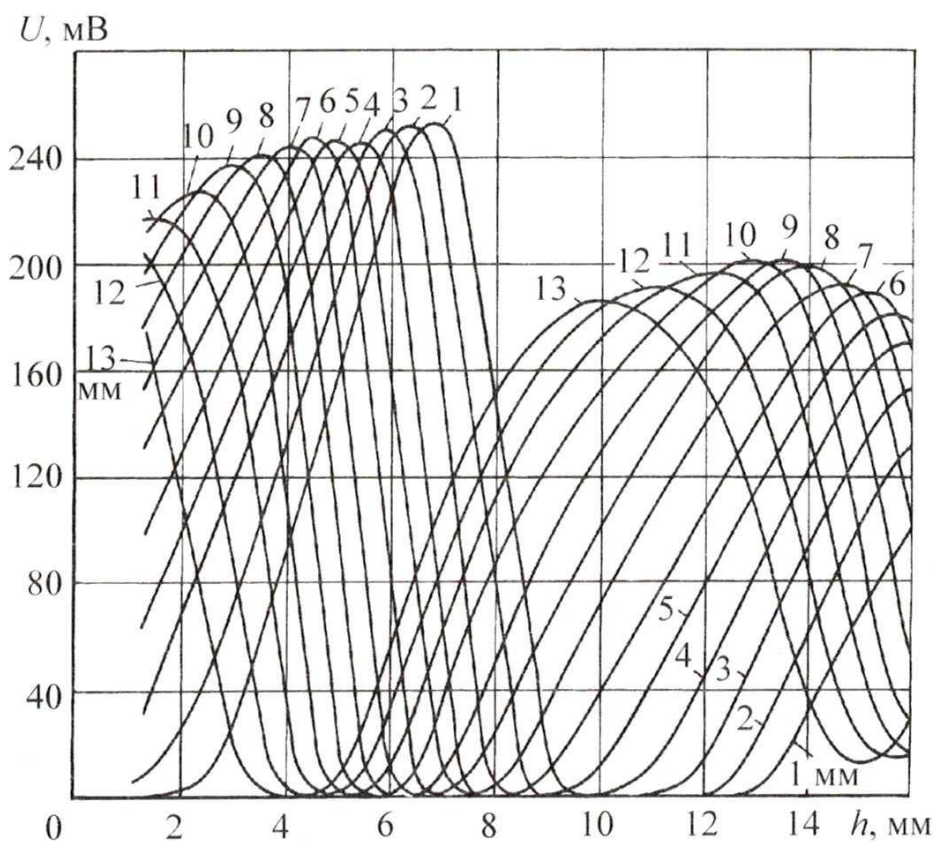


Рис. 9.13. Зависимость коэффициента отражения от толщины диэлектрического слоя, находящегося на металле, для различных расстояний между излучающей антенной и металлом

Амплитудно-фазовый метод пригоден для активного контроля толщины диэлектрических изделий и покрытий. Известны различные оригинальные конструкции СВЧ-датчиков, совмещенных с режущим инструментом, например типа «волновод-фреза», в котором измерительное плечо интерферометра заканчивается торцевой фрезой с отверстием.

Амплитудно-фазовый метод широко применяют для бесконтактного автоматизированного контроля толщины металлических лент, полос, проката при двухстороннем расположении антенн

датчика относительно объекта контроля (рис. 9.14). Волна от СВЧ-генератора проходит одинаковый путь при номинальной толщине листа до схемы сравнения с опорным сигналом той же длины волны. В таком устройстве проявляются все преимущества СВЧ-метода: одинаковая точность при измерении листов различной толщины; независимо от состава или изменения свойств металла; за счет бесконтактности процесса контроля могут подвергаться испытаниям листы, нагретые до высокой температуры; применение широких пучков устраняет влияние неровностей поверхности листа.

Применение рупорно-линзовых антенн позволяет получить высокие значения $K_{СВ} = 120$ и обеспечить точность до 1 % в диапазоне длин волн 3,2...10 см при поперечных перемещениях листа до $\lambda_0/6$. В некоторых странах (Англия, Япония, Франция, Украина) подобные установки работают в десятисантиметровом диапазоне радиоволн.

В последнее время микроволновой метод стали применять для контроля толщины тонких металлических покрытий на прохождение, используя значительную крутизну затухания СВЧ-радиоволн в тонких металлических пленках. Практически амплитудно-фазовый метод становится чисто амплитудным. Известно, что для большинства металлов глубина проникновения микроволн (глубина скин-слоя) составляет в среднем 0,5 мкм (500 нм). Поэтому толщину сверхтонких металлических слоев и покрытий до 500 нм можно контролировать проходным микроволновым методом с высокими точностью и чувствительностью. Так, фирмой «Электрофизик» (ФРГ) разработан толщиномер «Электротест Т» с цифровой индикацией для измерения покрытий из серебра на зеркальных стеклах, покрытий из алюминия на конденсаторной фольге, видеопластинках и цифровых звуковых пластинках. Диапазон измерения толщин от 5 до 250 нм с погрешностью $\pm 3\%$. Рабочая длина волны прибора около 1 см. Для расширения диапазона измеряемых толщин необходимо увеличивать рабочую длину волны, но точность при этом будет снижаться.

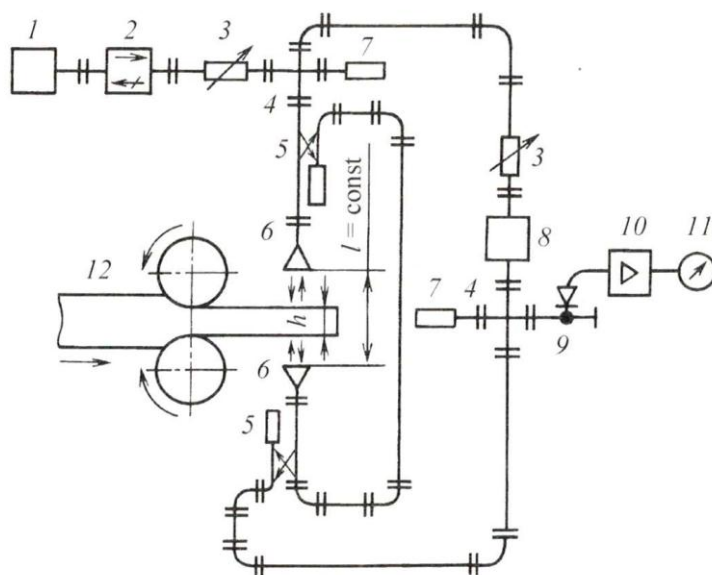


Рис. 9.14. Схема контроля толщины металлического листа:
 1 – генератор; 2 – вентиль; 3 – аттенюатор; 4 – двойной тройник;
 5 – направленный ответвитель; 6 – приемно-передающая антенна;
 7 – нагрузка; 8 – фазовращатель; 9 – детекторная секция; 10 – усилитель;
 11 – индикатор; 12 – прокатываемый металлический лист

Существуют и другие методы СВЧ-измерений параметров тонких металлических и диэлектрических пленок на подложках, например метод, основанный на зависимости тока генератора СВЧ от изменения параметров ОК. Это так называемый автодинный эффект.

[Вернуться в оглавление](#)

9.4.3. Частотно-фазовый метод

Данный метод, часто называемый методом переменной частоты, зародился в радиолокации и применяется в дальномерам и высотомерах, использующих частотную модуляцию несущего сигнала.

Метод реализуется при периодическом во времени изменении частоты СВЧ-генератора. Устройство (рис. 9.15, б) содержит электрически перестраиваемый по частоте СВЧ-генератор, узел разделения падающего и отраженного сигнала (симметричный направленный ответвитель), узел обработки отраженного сигнала совместно с опорным сигналом, приемно-передающую антенну и индикатор. При перестройке частоты СВЧ-генератора зависимость

результатирующего сигнала будет осциллирующей и значение искомой толщины определяется как

$$h = \frac{NGc}{\sqrt{\varepsilon_2}(f_2 - f_1)},$$

где G – период осцилляции; N – число периодов (пиков); f_1, f_2 – крайние значения частоты перестройки; c – скорость света.

Метод переменной частоты может быть реализован и при двухантенной схеме (рис. 9.15, а). Если изменять частоту СВЧ-генератора и регистрировать разность частот, соответствующую ближайшим экстремальным значениям отраженного от диэлектрического слоя сигнала, то можно определить толщину материала:

$$h = \frac{c}{4\sqrt{\varepsilon_2}\Delta f}.$$

Чтобы исключить из выражения диэлектрическую проницаемость, необходимо провести измерение при новом значении толщины, дающем новую разность частот. При этом, совместно решая уравнения, будем иметь

$$h = \frac{|\pm \Delta h| \Delta f'}{\Delta f' - \Delta f}.$$

Частотно-фазовый метод позволяет производить абсолютные измерения толщины диэлектрических сред способом на отражение в широком интервале изменений толщины с погрешностью 3...6 %. Следует отметить, что ошибка измерения в значительной степени определяется точностью измерения частоты. Метод используют в толщиномерах строительных конструкций, ледового покрова и т.п.

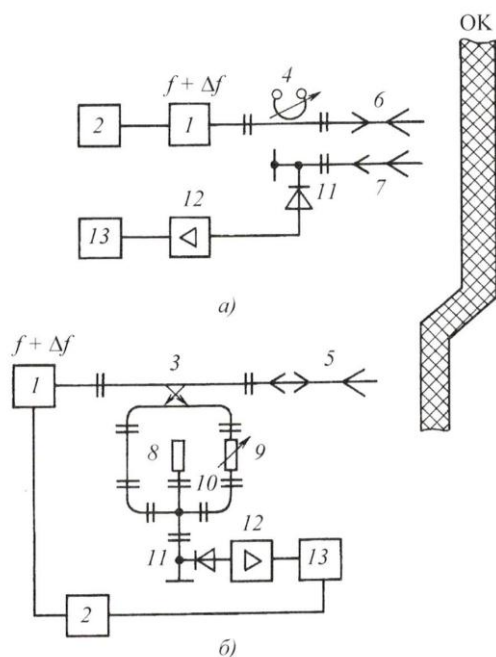


Рис. 9.15. Частотно-фазовый метод в двухантенном (а) и одноантенном (б) вариантах:

1 – перестраиваемый СВЧ-генератор; 2 – модулятор; 3 – симметричный направленный ответвитель; 4 – волномер; 5 – приемно-передающая антенна; 6 – передающая антенна; 7 – приемная антенна; 8 – нагрузка; 9 – аттенюатор; 10 – двойной тройник; 11 – детекторная секция; 12 – усилитель; 13 – индикатор

В наиболее распространенных методах толщинометрии выходной сигнал, используемый для градуировки индикаторного прибора в значениях толщины, представляет функцию двух переменных: толщины и диэлектрической проницаемости материала ОК. В этой связи целесообразно более подробно рассмотреть двухпараметровый многочастотный метод НК. Многочастотный метод заключается в измерении коэффициента отражения от поверхности ОК (в общем случае многослойного) на ряде фиксированных частот, число которых равно или превышает число параметров, подлежащих контролю. Подставляя в формулы для коэффициента отражения его измеренные значения, получим систему нелинейных уравнений, где неизвестны исследуемые параметры – толщина измеряемых слоев и диэлектрическая проницаемость материалов. Эту систему можно решать численными методами (Фурье-преобразованиями частотной зависимости коэффициента отражения, методом параметрической оптимизации, методом синтеза огибающей радиоимпульса и др.).

Структурная схема прибора, реализующего многочастотный метод, показана на рис. 9.16. Так как информация считывается на трех и более частотах, то для переключения частот генератора служит коммутатор К2. Для измерения модуля коэффициента отражения необходимы два канала (два электрических сигнала), поочередно подключаемые через усилитель У к АЦП через коммутатор К1. Для документирования процесса контроля служит печатающее устройство ПУ.

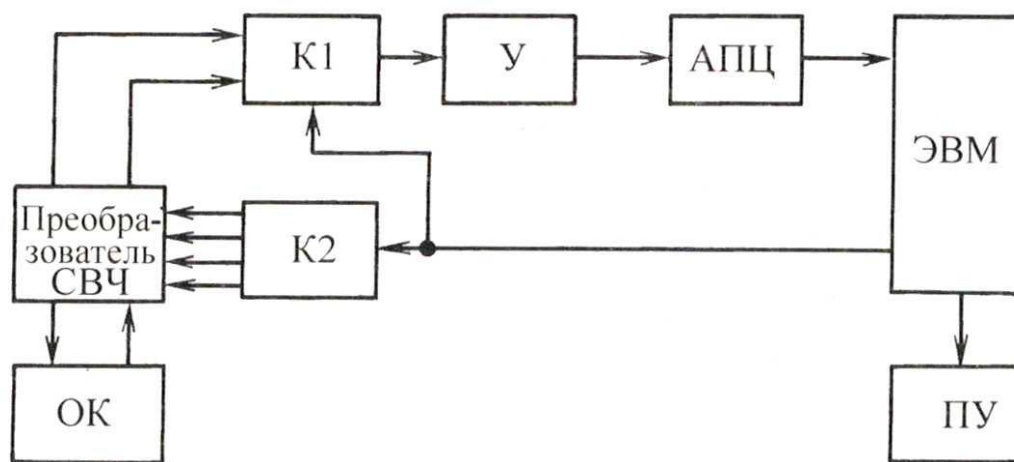


Рис. 9.16. Структурная схема прибора, реализующего многочастотный метод

Прибор работает следующим образом. ЭВМ управляет коммутатором К2, который обеспечивает переключение частот. Отраженный от ОК сигнал и сигнал от генератора через СВЧ-преобразователь подаются на коммутатор К1, который по команде ЭВМ поочередно подключает выход СВЧ-преобразователя через усилитель к АЦП. Сигналы в цифровой форме поступают в ЭВМ, где находится их отношение, дающее модуль коэффициента отражения. Затем цикл повторяется для всех используемых частот. После перестройки генератора на последнюю частоту и получения информации с АЦП ЭВМ прекращает запрос данных и определяет толщину слоев. Затем ЭВМ выводит численные значения толщины на печатающее устройство и одновременно посылает управляющий сигнал на коммутатор К2. Цикл повторяется.

[Вернуться в оглавление](#)

9.4.4.Метод радиоволновой эллипсометрии

В основе метода лежит преобразование линейно поляризованной волны при отражении от ОК в волну, поляризованную по эллипсу, и измерение параметров последнего.

На практике в микроволновом диапазоне удобно измерять два основных эллипсометрических параметра, которые описывают форму и ориентацию эллипса поляризации: эллиптичность как отношение осей эллипса и азимут – угол большой оси эллипса к плоскости падения падающей и отраженной электромагнитных волн. Исследованиями установлено, что толщину тонких металлических пленок в диапазоне от 0,01 до 0,20 мкм на диэлектрических подложках можно контролировать путем измерения азимута отраженной СВЧ-волны, а толщину диэлектрических пленок в диапазоне от 1 до 100 мкм на металле – путем измерения величины эллиптичности.

Отличительной особенностью приведенных случаев является изменение только одного эллипсометрического параметра. Эллиптичность (для системы металлическая пленка на диэлектрике) и азимут отраженной волны (для системы диэлектрическая пленка на металле) остаются постоянными с приемлемой для практики точностью. Выводы справедливы только для радиоволнового диапазона и физически вытекают из большой разности показателей преломления пленки и подложки в рассматриваемом диапазоне.

Если падающую волну выбрать линейно-поляризованной, то азимут отраженной волны при контроле металлических пленок можно измерить по величине отношения ортогональных составляющих, поляризованных в плоскости падения и перпендикулярной ей. Это значительно упрощает процесс измерений и позволяет автоматизировать его. При измерении диэлектрических пленок появление эллиптичности в отраженной волне при линейно-поляризованной падающей свидетельствует о наличии пленки на металлической поверхности, а ее величина характеризует толщину, т.е. измерения необходимо производить от «нуля», и нижний предел контролируемых толщин определяется чувствительностью детектора СВЧ-излучения и характеристиками измерительных усилителей.

Метод реализован в приборе для контроля толщины пленок

хрома на стеклянных подложках, идущих на изготовление фотошаблонов.

На показывающем приборе получаем отношение амплитуд ортогонально поляризованных составляющих сигнала $q = U_s/U_p$. При этом поляризационные характеристики отраженной волны определяются с погрешностью до $\pm 1\%$, показатель преломления и толщина слоя – с погрешностью до ± 3 и $\pm 8\%$ соответственно. Рабочий диапазон длин волн 2,5...3 мм.

[Вернуться в оглавление](#)

9.5. Акустические методы и приборы для измерения толщины

Необходимость измерения толщин различных объектов (труб, стенок котлов, корпусов судов и т. п.) при одностороннем доступе к ОК актуальна для большинства отраслей промышленности. Диапазон этих толщин 0,1...1000 мм, однако в большинстве случаев он составляет 0,5...50 мм. Во второй половине XX века для измерения толщины широко использовали локальный метод собственных частот (резонансный метод), в котором информативным признаком служат собственные частоты ОК. Схема резонансного толщиномера существенно сложнее, чем импульсного. Кроме того, и по эксплуатационным свойствам резонансный толщиномер значительно уступает импульсному. Поэтому резонансный метод толщинометрии сейчас полностью вытеснен эхометодом, чему способствовало бурное развитие электроники и информационных технологий. В результате метод отражения стал практически единственным широко применяемым в промышленности УЗ-методом измерения толщины.

[Вернуться в оглавление](#)

9.5.1. Эхоимпульсные толщиномеры

Для измерения толщины при одностороннем доступе можно использовать эходефектоскопы общего назначения. Однако целесообразнее пользоваться упрощенными специализированными портативными приборами – ультразвуковыми толщиномерами. Они разнообразны по исполнению и выпускаются в больших количествах многими отечественными и зарубежными фирмами.

Все они портативны, имеют автономное питание и цифровые индикаторы. Современные толщиномеры снабжены жидкокристаллическими или люминесцентными дисплеями для представления дополнительной информации в виде графической (*A*-развертки), цифровой и текстовой. Многие толщиномеры обладают памятью, сохраняющей результаты многочисленных измерений. Предусматривается также связь с внешним компьютером, используемым для обработки и документирования результатов измерений.

Структурная схема импульсного толщиномера в общем подобна схеме импульсного дефектоскопа, в то же время ее отличают некоторые особенности, повышающие точность и удобство измерения толщины.

Излучатель преобразователя возбуждают электрическим импульсом с крутым фронтом, а полосы пропускания усилителя и преобразователя расширены в области высоких частот, чтобы обеспечить прохождение импульсов с таким фронтом. Это условие необходимо для прецизионных приборов. Автоматическая регулировка усиления обеспечивает постоянную амплитуду принятого донного сигнала, что важно для повышения точности измерения. Введен блок помехозащиты. Простейший способ помехозащиты – стробирование, т. е. включение приемника только на время измерительного цикла.

Измерительный узел (обычно им служит триггер) запускают начальным импульсом и выключают донным сигналом. В результате формируется импульс, длительность которого пропорциональна измеряемому интервалу времени. Имеется блок преобразования сигнала триггера в удобную для измерения времени форму, например в частоту. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) трансформирует этот сигнал в цифровой код и подает его на цифровой индикатор и сигнализатор, срабатывающий при выходе толщины за пределы допуска.

Отметим некоторые дополнительные устройства. Приборы, измеряющие время многократного прохождения импульса в ОК, имеют блок селекции, который выбирает начальный импульс (обычно второй донный сигнал), и от него начинают измерение времени. Эти толщиномеры имеют блок счета заданного количества n донных сигналов, что учитывают при преобразовании времени в толщину.

Приборы для контроля толщины ОК с корродированными поверхностями часто не имеют экрана с временной разверткой. Отсчет толщины выполняют по цифровому табло. Приборы, измеряющие многократное прохождение импульса в ОК, часто снабжают экраном с разверткой типа *A*, используемой для выбора оптимального интервала донных сигналов и предотвращения возможной ошибки при измерении малых толщин. Как отмечалось выше, когда толщина ОК меньше минимального значения, измеряемого прибором, прибор может зафиксировать не первый донный сигнал (который слился с начальным импульсом), а второй. Наблюдая на экране серию донных сигналов, этой грубой ошибки можно избежать.

При применении РС-преобразователей с призмами возникает задача выделения сигналов, проходящих только через ОК. Для этого излучающим преобразователем (работающим в данном случае как излучатель-приемник) принимают сигнал от границы призма-ОК, усиливают его отдельным усилителем и запускают им измеритель времени.

Для измерения толщины используют прямые, РС и (редко) наклонные преобразователи. При работе с толщиномерах следует использовать только преобразователи, указанные в технических описаниях соответствующих приборов. Преобразователи должны иметь жесткий протектор, чтобы интервал времени распространения импульса в возможно меньшей степени зависел от силы прижатия преобразователя к ОК.

При измерении толщины в процессе эксплуатации контролируемого оборудования возникает задача контроля при повышенной температуре. Разработан РС-преобразователь для контроля при температуре до 600 °С. В нем применены кварцевые призмы. Электроакустический экран выполнен из стальной фольги с прокладкой из миканита. Приемный и передающий отсеки заключены в цилиндрическую капсулу, которая перемещается в корпусе и прижимается к ОК пружиной с нормированной силой. Благодаря этим мерам за 15 с работы при температуре ОК 700 °С температура в зоне пьезоэлементов не поднимается выше 30 °С.

Технические требования к ручным толщиномерам перечислены в ГОСТ 28702-90. Согласно этому документу толщиномеры подразделяют на приборы общего назначения и специализирован-

ные (т.е. предназначенные для контроля изделий определенного типа), ручные и автоматизированные, с различной степенью защищенности от воздействия окружающей среды. Для толщиномеров различного назначения приведены основные рекомендуемые технические характеристики, указаны допустимые значения дополнительных погрешностей. Например, дополнительная погрешность от изменения окружающей температуры на каждые 10 °С (от нормального значения 20 °С) не должна превышать половины предела допускаемого значения основной погрешности; допустимое значение дополнительной погрешности, вызванной изменением напряжения питания от минимального до максимального значений, не должно превышать половины предела допускаемого значения основной погрешности толщиномера. Должна нормироваться условная чувствительность к выявлению локального утонения. Она определяется диаметром выявляемого плоскодонного отверстия, выбираемого из ряда от 0,5 до 2 мм.

Ультразвуковые толщиномеры должны проходить процедуру испытаний и утверждения в соответствии с правилами по метрологии ПР 50.2.009-94 «Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерений» по ГОСТ 8.001 и ГОСТ 8.383 или метрологическую аттестацию по ГОСТ 8.326.

При контроле объектов в процессе эксплуатации возникает необходимость оценки коррозионного повреждения корпусов морских и речных судов, стенок сосудов, трубопроводов, баллонов и т.п. Для решения таких задач в России широко используется толщиномер УТ-93П, выпускаемый АО «Интроскоп» (Республика Молдова). Он работает с РС-преобразователями, имеет рабочие частоты 2,5; 5 и 10 МГц. Диапазон измеряемых толщин 0,6...1000 мм. При испытаниях на стандартных образцах толщиной до 30 мм погрешность не превышает 0,1 мм, при больших толщинах – $\pm(0,1 + 0,001 K)$ мм. Прибор измеряет толщину стенок труб диаметром 6 мм и более. Допустимая шероховатость наружной поверхности $Rz = 160$ мкм, а внутренней – 320 мкм. Толщиномер обнаруживает локальные уменьшения толщины, измеряет толщину объектов с непараллельными поверхностями.

Прибор УТ-93П дает цифровой отсчет толщины ОК из материалов со скоростью звука от 3000 до 6400 м/с. При известном значении толщины (в диапазоне 20...300 мм) он может использо-

ваться как измеритель скорости. Прибор имеет автономное питание, массу 0,4 кг.

[Вернуться в оглавление](#)

9.5.2. Цифровые толщиномеры

Как и цифровые дефектоскопы, в последние годы практически во всех нишах применения все больше используются новейшие цифровые толщиномеры. Их преимущества аналогичны преимуществам цифровых дефектоскопов. Для точного измерения толщины изделий с гладкими параллельными поверхностями в процессе их изготовления в авиационной, приборостроительной и других отраслях промышленности предназначены толщиномеры серии TM1 американской компании StressTel. Базовый прибор обеспечивает измерение толщины в диапазоне 0,25...25 мм с погрешностью 0,01 мм по стали. Вариант прибора TM1-D PLUS позволяет измерять толщины до 380 мм, а вариант TM1-CD имеет погрешность 0,001 мм. Приборы снабжены четырехразрядными цифровыми индикаторами. Они работают с сильно демпфированными РС-преобразователями с плоскопараллельной задержкой из пластмассы или графита. Рабочие частоты от 5 до 22 МГц. Питание батарейное, масса около 0,5 кг, имеются блок памяти и сигнализатор.

В ЗАО «НИИИН МНПО «СПЕКТР» разработаны и выпускаются несколько модификаций толщиномеров, основой которых является идеология «полного цифрового тракта», обеспечивающая стабильность параметров, гибкость и универсальность схемы, минимизацию габаритов, а также устойчивые измерения при различном качестве поверхности объектов контроля (функциональная схема ЦТ приведена на рис. 9.17).

Особое место в этой серии занял УЗ-толщиномер А1207, выполненный в виде миниатюрного моноблока, в который встроен отдельно-совмещенный преобразователь на 10 МГц, размещены электронная схема, источник питания и индикатор (рис. 9.18). Такое решение по сравнению с классической компоновкой обеспечивает повышение надежности за счет отсутствия кабельного соединения преобразователя с электронным блоком; улучшение метрологических характеристик путем оптимизации параметров

тракта и алгоритма измерения толщины под особенности конкретного преобразователя; упрощение процедуры контроля благодаря высвобождению одной руки дефектоскописта; минимизацию органов управления; уменьшение стоимости прибора.

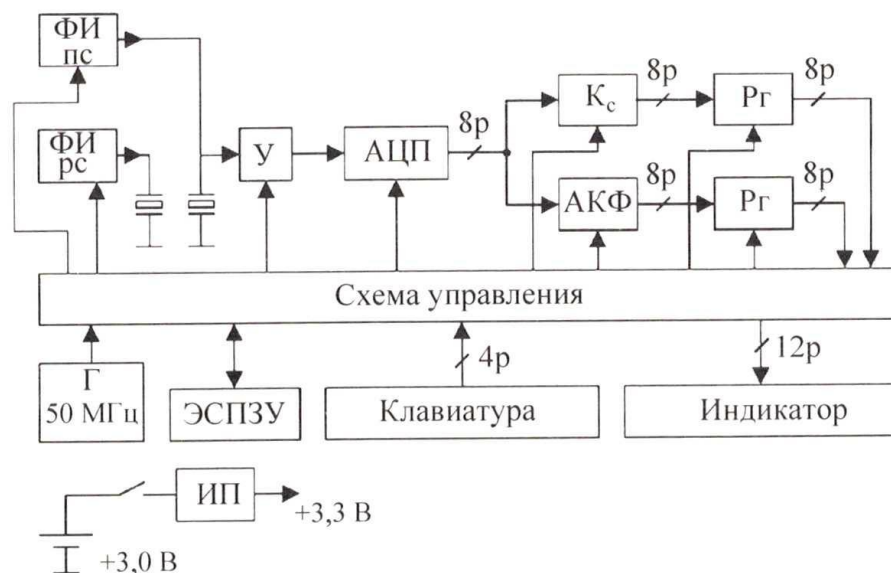


Рис. 9.17. Функциональная схема цифровых толщиномеров:
 ФИ – формователь импульсов; У – усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; К_с – стробируемый компаратор;
 Р_г – регистр; Г – генератор; ЭСПЗУ – электростираемое ПЗУ;
 АКФ – аппаратный блок вычисления АКФ;
 ИП – источник питания

Толщиномер выполнен в форме, напоминающей авторучку. Прибор управляется всего двумя кнопками, одна из которых включает и выключает питание, другая служит для выбора нескольких предустановленных скоростей ультразвуковых волн.

Толщиномер А1208 – классический простой и надежный прибор, работающий с РС-преобразователями нескольких типов. По уровню защиты от внешних воздействий он отвечает требованиям IP65. В приборе установлен четырехразрядный алфавитно-цифровой светодиодный дисплей, что позволяет эксплуатировать его в широком диапазоне температур (от –30 до +50 °С). Режимы и настройками прибора управляют с помощью расширенного меню, каждый пункт которого выполнен в виде «бегущей строки». Прибор обеспечивает: настройку на произвольную скорость УЗ, адаптацию к преобразователю, измерение толщины по двум отра-

жениям, запись в энергонезависимую память параметров используемых преобразователей.

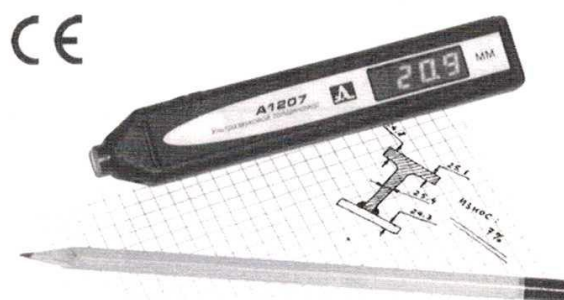


Рис. 9.18. Толщиномер A1207

Толщиномер *A1209C* также построен по схеме полного цифрового тракта. Он работает практически со всеми типами совмещенных и РС-преобразователей в диапазоне частот 1,25...15,0 МГц, дает изображение в виде развертки типа *A*. Толщиномеры с РС-преобразователями получили широкое распространение благодаря высокой чувствительности и широкому диапазону измерений. Но в большинстве практических случаев высокая чувствительность толщиномера не используется. В то же время РС-преобразователи весьма подвержены износу.

Поскольку о преимуществах толщиномера с совмещенным УЗ-преобразователем уже говорилось, то очевидно, что его использование в толщиномере широкого применения предпочтительно. Однако собственный реверберационный шум совмещенного преобразователя не позволяет измерять толщины порядка 1...3 мм при радиусах кривизны 10...30 мм (мертвая зона). В изделиях с толщинами менее нескольких миллиметров, включая и трубы малых диаметров, практически всегда возникают импульсы многократных отражений между поверхностями ОК. Эти импульсы несут информацию о толщине материала, и их можно использовать для измерений, даже если первый и последующие эхосигналы будут ниже уровня собственной реверберации ПЭП.

В ЗАО «НИИИИН МНПО «СПЕКТР» разработаны адаптивные алгоритмы корреляционной обработки сигналов многократных отражений ультразвука в слое материала, которые позволяют создавать УЗ-толщиномеры широкого применения как с совме-

ценными ПЭП, так и с ЭМАП. В этих приборах используется оцифровка эхосигнала до детектирования и последующая его обработка спецпроцессором по предложенному алгоритму. Это позволяет измерять толщины одним совмещенным преобразователем в диапазоне от 0,5 до 300 мм как по гладким, так и по шероховатым криволинейным поверхностям.

Одна из последних разработок – толщиномер *A1210* (рис. 9.19), обладающий дополнительными функциями, расширяющими его возможности и повышающими удобство работы.



Рис. 9.19. Толщиномер A1210

Прибор позволяет получать стабильные результаты при измерениях через полимерные и лакокрасочные покрытия без зачистки. Предусмотрен режим измерения с индикацией, измеряемой в процентах от остаточной толщины ОК. Цветовая и звуковая сигнализация сообщают о выходе толщины из установленных верхнего и нижнего пределов. Диапазоны измеряемых толщин (по стали) от 0,7 до 300 мм, основная погрешность измерений в диапазоне толщин от 0,7 до 1,5 мм и от 10,0 до 49,9 мм составляет $\pm 0,1$ мм, от 1,51 до 9,99 мм – $\pm 0,05$ мм. Предусмотрена энергонезависимая память на 50 000 результатов измерений, включая 4000 /4-сканов, а также связь с внешним компьютером. Рабочие частоты 2,5 и 4,0 МГц. Диапазон рабочих температур от -20 до $+50$ °С. Масса электронного блока 250 г, габариты 157×70×23 мм.

[Вернуться в оглавление](#)

9.5.3. Толщиномеры с ЭМА-преобразователями

Ранее отмечалась перспективность использования ЭМАП в приборах для измерения толщины. Широкополосность таких преобразователей позволяет формировать короткие импульсы, что важно для достижения высокой точности. ЭМАП возбуждают горизонтально поляризованные поперечные (SH) волны, скорость распространения которых примерно вдвое меньше, чем продольных. Это увеличивает измеряемый интервал времени и соответственно уменьшает погрешность $\Delta t_2/t_1$ минимальную измеряемую толщину.

В ЗАО «НИИИИН МНПО «СПЕКТР» разработан портативный (масса с элементами питания 800 г) ЭМА-толщиномер типа *A1270*, предназначенный для измерения толщины плоских и цилиндрических деталей и узлов из сплавов алюминия и других материалов с регистрацией результатов контроля.

Особенности ЭМА-толщиномера. ЭМА-толщиномер *A1270* является переносным портативным прибором для ручного ультразвукового контроля объектов в цехах и на открытых площадках, в условиях запыленности, повышенной влажности воздуха и умеренных осадков. Степень защиты от внешних воздействий соответствует IP65. Отсутствие необходимости применения контактных жидкостей существенно снижает требования к подготовке поверхности ОК и обеспечивает надежность и стабильность возбуждения и приема УЗ-колебаний.

Наличие процессора и графического дисплея повышает информативность измерений, дает возможность сохранения значения минимальной толщины, позволяет оценивать скорость звука по измеренному значению толщины в доступной части металла с точностью до 1 м/с. Принятые меры по повышению экономичности энергопотребления обеспечивают устойчивую работу толщиномера в автономном режиме в течение всей рабочей смены.

Наличие графического дисплея позволяет использовать толщиномер в режиме дефектоскопии металла заготовок и изделий в целях обнаружения дефектов типа расслоений, неметаллических включений, эрозионных и коррозионных повреждений.

Благодаря возможности возбуждения в ОК ЭМАП сдвиговых волн с поляризацией вдоль и поперек направления прокатки, тол-

щиномер позволяет оценить степень анизотропии проката. Возможен контроль изделий с выпуклыми и вогнутыми поверхностями с минимальным радиусом от 50 мм, поскольку процедура измерения толщины не связана с влиянием акустического контакта.

Результаты измерения отображаются на экране дисплея с дискретностью 0,01 мм в диапазоне толщин от 0,5 до 25 мм и 0,1 мм при измерении толщин более 25 мм. Дисплеем служит графический жидкокристаллический модуль с подсветкой для работы в темноте. Возможно подключение прибора к персональному компьютеру, что позволяет использовать его для исследований, совершенствования технологии обработки металла и как инструмент для регистрации и накопления информации о технологическом процессе производства и техническом состоянии сложных ОК. Предусмотрены режимы поиска минимального значения толщины в заданной области контроля изделия, автоматический выбор метода измерения (пороговый или по аргументу автокорреляционной функции).

[Вернуться в оглавление](#)

9.6. Спектрально-акустический метод.

Автоматизированная акустическая система «АСТРОН»

В настоящее время разработано и эксплуатируется несколько конфигураций автоматизированной акустической системы «АСТРОН», предназначенной для оценки физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния материала ответственных элементов различных технических объектов.

Ниже описаны аппаратно-программные компоненты системы (рис. 9.20), а также используемые оригинальные пьезоэлектрические преобразователи.

Аппаратная часть системы содержит:

- оригинальный блок накопления акустической информации, назначение которого – излучение и прием зондирующих акустических импульсов мегагерцового диапазона, их преобразование в цифровой код, запись в устройство хранения и передача в ПЭВМ;
- комплект оригинальных акустических датчиков;
- ПЭВМ типа NOTEBOOK.

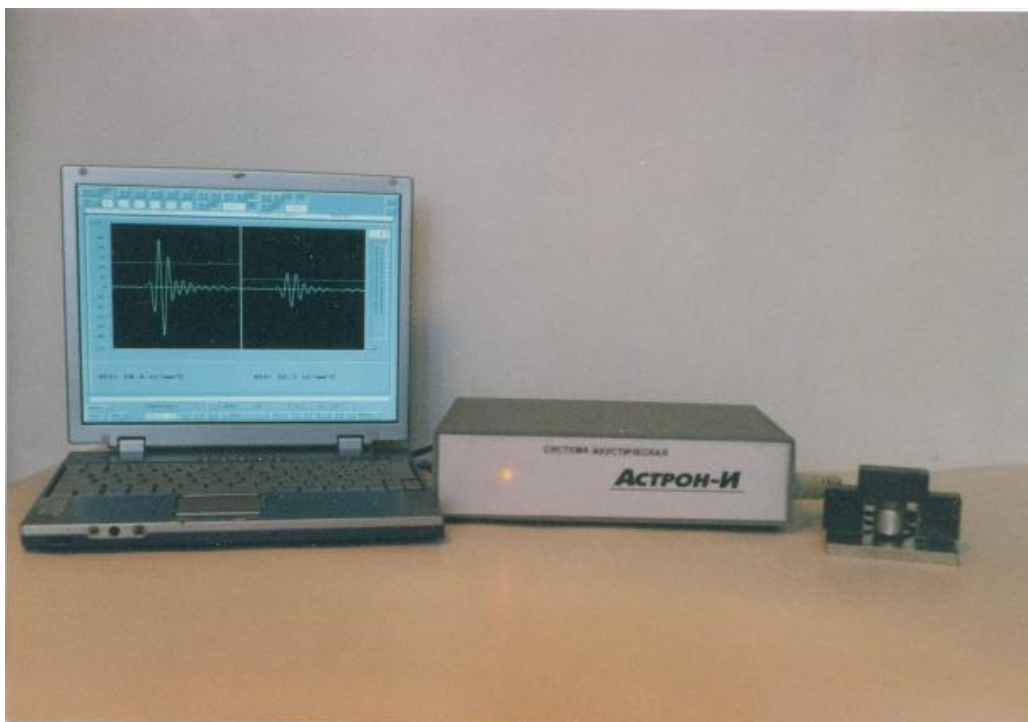


Рис. 9.20. Внешний вид системы

В основу работы аппаратной части системы положен способ подробной регистрации всей серии отраженных акустических импульсов для ее последующей обработки средствами программной части системы.

Для передачи первичной акустической информации в обрабатывающую часть системы (компьютер типа NOTEBOOK) производится последовательное преобразование осциллограммы отраженных импульсов с определенным шагом дискретизации с момента зондирования исследуемого материала и до прихода n -го отраженного импульса.

Экспериментальные исследования показали, что оптимальной величиной для шага дискретизации является величина 5–10 нс. Эта величина позволяет в рамках решаемой задачи обеспечить относительную погрешность определения временных параметров, не превышающую значения 10^{-5} .

Для эталонирования всего тракта «аппаратная часть-датчик-материал» использован метод «эталонирующего датчика», который заключается в следующем. К системе подключается датчик продольных волн, наклеенный на призму из оргстекла, которая перед измерением устанавливается на исследуемый материал для

приведения их к одной температуре. После этого проводится цикл «прием-обработка-формирование температурных поправок». В результате этого становится возможным одновременно учитывать влияние температуры исследуемого объекта и температурного дрейфа аппаратной части системы (рис. 9.21).

Система состоит из следующих элементов:

- I. Измерительный модуль.
- II. Процессорный модуль (компьютер типа NOTEBOOK).
- III. Преобразователь первичный пьезоэлектрический («далее преобразователь»).
- IV. Объект контроля.

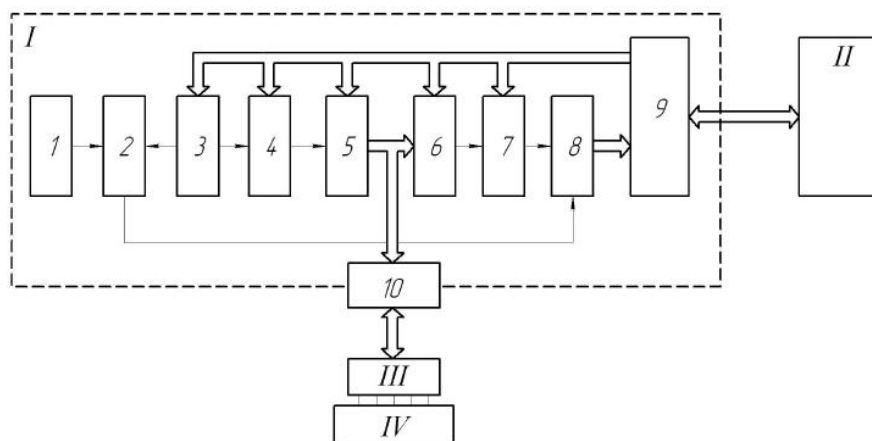


Рис. 9.21. Функциональная схема системы «АСТРОН»

Процессорный модуль является управляющим элементом системы.

Управляющие сигналы процессорного модуля поступают в измерительный модуль на устройство ввода-вывода (9). С него декодированные сигналы по шинам данных идут на:

- управляющее устройство (3);
- формирователь длительности зондирующего импульса (4);
- многоканальный усилитель мощности (5);
- многоканальный входной усилитель (6);
- регулируемый усилитель (7).

При поступлении от процессорного модуля команды о начале работы управляющее устройство запускает стробоскоп (2) который по стабильным временным меткам кварцевого генератора (I) формирует серию импульсов для запуска аналого-цифрового

преобразователя (8). Одновременно запускается формирователь зондирующего импульса. Сформированный с заданной длительностью зондирующий импульс через выбранный канал многоканального усилителя мощности поступает через наружный разъем измерительного модуля на преобразователь. Преобразователь осуществляет преобразование электрического импульса в механические колебания, возбуждающие в объекте контроля (*IV*) акустические импульсы. Прошедшие через объект контроля акустические импульсы за счет пьезоэффекта создают электрические импульсы, поступающие на выбранный канал предварительного усилителя. С предварительного усилителя через регулируемый усилитель сигналы поступают на аналогово-цифровой преобразователь. Через устройство ввода-вывода цифровой код передается в процессорный модуль. Процессорный модуль осуществляет прием цифрового кода, его преобразование, вывод визуальной информации о форме отраженных импульсов на экран. В соответствии с выбранной пользователем программой производятся временные или амплитудные измерения отраженных импульсов. По результатам этих измерений программно производится расчет временных интервалов и коэффициентов затухания.

Измерительный модуль состоит из печатной платы, с расположенными на ней элементами электрической схемы. Печатная плата расположена в корпусе. Органов регулировки на корпусе нет. Для связи с преобразователем имеется многоштыревой разъем. Связь с процессорным модулем осуществляется многожильным кабелем.

Система допускает два варианта эксплуатации: стационарный и переносной.

В первом варианте система представляет собой многофункциональное автоматизированное рабочее место.

Стационарный режим эксплуатации системы может быть реализован в виде двух подрежимов:

1. Режим сканирования объекта контроля, который заключается в том, что оператор производит многократные измерения в различных зонах объекта с одновременной регистрацией результатов на устройствах визуализации – дисплее, принтере, плоттере.

2. Режим непрерывного слежения за поведением материала.

Этот режим особенно удобен для контроля состояния мате-

риала ответственных объектов, нахождение вблизи которых оператора недопустимо вследствие загазованности, повышенного радиоактивного фона, угрозы внезапного разрушения и т. п.

В данном режиме датчики (до нескольких сотен единиц) можно устанавливать на объект стационарно, накопитель акустической информации периодически опрашивает датчики и по линии связи (это может быть телефонная линия) передает информацию в компьютер оператора, который может находиться на любом удалении от объекта. Может быть предусмотрена возможность передачи информации по каналам радиосвязи.

При эксплуатации системы в переносном варианте оператор обследует объект или путем сканирования штатными датчиками системы или подключаясь к датчикам, стационарно установленным на объекте.

Разработанные варианты системы, являясь базовыми, предусматривают широкие возможности реконфигурации аппаратных и программных компонентов системы.

Система удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым Ростехнадзором к подобной аппаратуре.

Программная часть системы содержит пакет программ, состоящий из двух модулей:

- системная часть программного обеспечения, обеспечивающая функционирование и взаимодействие всех компонентов системы в реальном масштабе времени;

- алгоритмическая часть, обеспечивающая обработку информации и оперативную выдачу заключения о состоянии материала на основании сравнения результатов текущей спектрально-акустической обработки с содержанием базы данных, сформированной в ходе обучающего акустомеханического эксперимента для данного материала и данного диапазона внешних воздействий;

Программная поддержка системы обеспечивает удобный диалоговый режим, не требующий от оператора знаний программирования. В алгоритмах обработки первичной акустической информации чрезвычайно важен учет температуры окружающей среды, а в случае использования датчиков с фиксированной базой (например, датчиков релеевских волн) – и температуры самого датчика.

В разработанной системе эта проблема решена путем использования интеллектуализированных датчиков, содержащих в себе кроме пьезоэлементов и микродатчики температуры. При этом результат каждого измерения представляет собой информационный массив длиной, задаваемой оператором системы и зависящей от толщины материала и типа используемых упругих волн. Этот массив кроме первичной информации содержит несколько служебных байтов, в том числе байт, кодирующий значение температуры, соответствующей данному измерению. Программное обеспечение системы поддерживает режим самодиагностики системы и режим интеллектуального запуска, заключающийся в следующем. После настройки расчетных алгоритмов и установки датчика на объект происходит пробный запуск системы, в результате которого полученная первичная акустическая информация передается в программный блок предварительного анализа. Этот блок поддерживает ряд алгоритмов корреляционной и спектральной обработки, позволяющих на основе многокритериального сравнения принятого массива с эталонными массивами, содержащимися в банке данных системы, сделать заключение о корректности принятой информации. В том случае, если данный массив не выходит за границы «акустического портрета» исследуемого материала, система (при необходимости) повторяет измерение заданное число раз, усредняет исходную информацию и направляет ее в основной обрабатывающий блок. Если принятая информация не соответствует «акустическому портрету» материала, система блокирует запуск основных обрабатывающих алгоритмов и выдает соответствующее диалоговое сообщение.

С системой «АСТРОН» широко используются преобразователи поверхностных волн, представляющие собой выполненные в одном корпусе излучатель и приемник (рис. 9.22).

Датчик состоит из двустороннего клина из оргстекла 1 с углом ввода ультразвука 27° (для объектов контроля из стали), излучателя 2 и приемника 3 релеевских волн с центральной частотой 5 МГц. База (расстояние между поверхностями излучения и приема) может варьироваться в широких пределах в зависимости от геометрических размеров зон измерения.

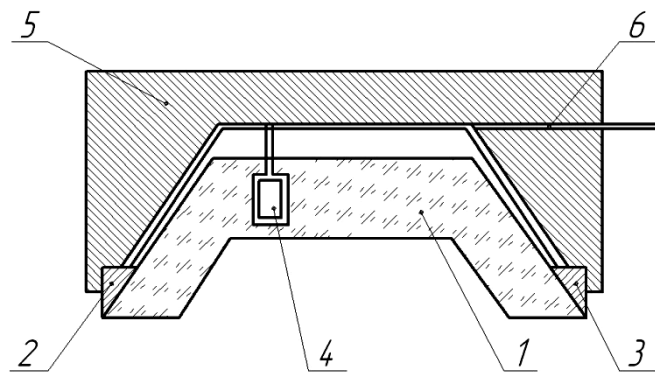


Рис. 9.22. Малобазный релеевский датчик:

- 1 – двусторонний клин из оргстекла; 2 – излучатель релеевских волн;
 3 – приемник релеевских волн; 4 – излучатель-приемник термоимпульсов;
 5 – корпус; 6 – высокочастотный кабель

Датчики могут быть изготовлены разных типов: с различной базой; с различными центральными спектральными частотами; с различной формой спектров импульсов; с различной конфигурацией излучающих поверхностей.

Двусторонний клина из оргстекла имеет большой коэффициент теплового расширения. Температурное изменение суммарного акустического пути приводит к значительным погрешностям временных измерений. Для учета этих температурных эффектов используется специальный дополнительный преобразователь 4, формирующий термоимпульс (рис. 9.23).

Задержка термоимпульса определяется временем его прохождения только в оргстекле и зависит от температуры преобразователя линейным образом. В процессе проведения тарировочного эксперимента, устанавливаются параметры зависимости задержки продольного импульса от температуры преобразователя. В дальнейшем в процессе определения физико-механических характеристик в расчетный алгоритм вносятся соответствующие корректирующие поправки.



Рис. 9.23. Типичная осциллограмма импульсов:
 1 – рабочий импульс релеевской волны; 2 – первый отраженный термоимпульс; 3 – второй отраженный термоимпульс

ИВК «АСТРОН» позволяет оперативно оценить толщину тонких металлических и неметаллических покрытий толщиной от 2–3 до 50 мкм, нанесенных с использованием различных технологий: химникелирование, плакирование, лазерное напыление, напыление взрывом и др. Определение толщины покрытий проводится с использованием разработанного нами стандарта ГОСТ Р «Контроль неразрушающий. Определение толщины металлических покрытий акустическим методом. Общие требования» (стандарт вводится в действие в 2013 г.).

Относительная погрешность определения толщины покрытия составляет порядка 10 %.

На основании специальных приемов спектральной обработки разработан и для покрытий, нанесенных с использованием различных технологий, опробован алгоритм оценки наличия адгезии, ее величины, а также приблизительной оценки интегральной пористости покрытия.

[Вернуться в оглавление](#)

9.7. Контрольные вопросы

1. Что такое вихретоковый толщиномер?
2. Какие толщиномеры различают по конструктивному исполнению?
3. От каких параметров зависят результаты измерений вихретоковыми толщиномерами?
4. Для контроля толщины каких покрытий предназначены магнитные толщиномеры?
5. На какие виды подразделяются приборы оптической толщинометрии по принципу действия?
6. Для чего используются методы СВЧ-толщинометрии?
7. Что содержит аппаратная часть системы «АСТРОН»?
8. Какие преобразователи используются с системой «АСТРОН»?

[Вернуться в оглавление](#)

ГЛАВА 10. ПЕРСПЕКТИВЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

10.1 Диагностика покрытий и слоев с разрешением по глубине. Многослойные покрытия

Диагностика покрытий и слоев с разрешением по глубине или послойный анализ ПС в математической постановке относится к классу существенно некорректных обратных задач. Впервые в таком виде эта задача была сформулирована [1, 2] применительно к послойному анализу упрочненных слоев ферромагнитных материалов методом магнитных шумов в следующем виде:

$$v(y) = \int_0^{\infty} \varphi\{x, y, \sigma(x)\} e^{-\alpha(y)x} dx, \quad (10.1)$$

где $v(y)$ – эффективное напряжение шума Баркгаузена в накладном преобразователе, зависящее от варьируемого в процессе эксперимента параметра y (например, ток перемагничивания или частота анализа); $\varphi\{x, y, \sigma(x)\}$ – вклад слоя в сигнал; $\alpha(x)$ – контролируемый параметр, зависящий от глубины x ; $\alpha(y)$ – коэффициент затухания магнитного шума в ферромагнетике, который в общем случае зависит от параметра y .

Если реконструируемой функцией является распределение внутренних напряжений по глубине (после ППД), $\alpha(x)$, то задача реконструкции напряжений с разрешением по глубине может быть представлена в виде следующего интегрального уравнения:

$$\tilde{V}(i) = \int_0^f \sigma(x) e^{-\alpha(i)x} dx, \quad (10.2)$$

Уравнение (10.2) представляет математически некорректное уравнение Фредгольма 1-го рода и может быть решено традиционным методом регуляризации Тихонова [3]. На основе этого подхода разработан программно-аппаратный комплекс INTRMAT для промышленной реализации послойного анализа упругих напряжений на поверхности изделий, подвергнутых ППД.

На рис. 10.1 приведены профили напряжений $\sigma(x)$, полученные для образцов стали 30ХГСНА после ППД по измеренным данным $V(i)$ в результате решения уравнения (2). Для сравнения здесь же приведены эпюры напряжений на тех же образцах, измеренные независимым разрушающим методом Давыденкова. Видно, что оба метода имеют хорошее соответствие. При этом погрешность, которую обеспечивает метод реконструкции, не превышает 20 %, что достаточно для многих прикладных задач.

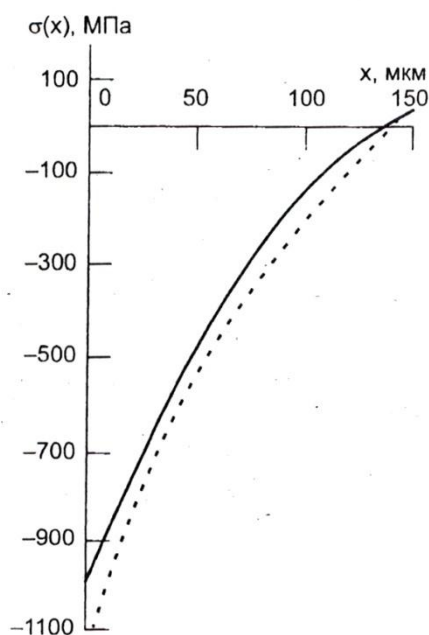


Рис. 10.1. Профили напряжений $\sigma(x)$, полученные для образцов из стали 30ХГСНА в результате решения уравнения (10.2) (штриховая линия) и измеренные методом Давыденкова (сплошная) [2]

В основе послойного анализа ферромагнетиков лежит зависимость магнитных характеристик от напряжений или других свойств ПС. Значительно сложнее ситуация с немагнитными проводящими материалами, у которых проводимость очень слабо зависит от напряжений. Для большинства конструкционных материалов эти изменения не превосходят 3 % во всём диапазоне упругости. В этом случае используют связь частотных спектров с напряжениями. Американскими исследователями разработаны методы обращения спектров вихретоковых сигналов для реконструкции функции изменения напряжений с разрешением по глубине. Проблема исключительно актуальна для космической и

авиационной промышленности, где практически все несущие элементы подвергаются поверхностному упрочнению методами ППД. На рис. 10.2 приведены спектры мнимой составляющей поверхностной проводимости (Apparent Eddy Current Conductivity, АЕСС) для образцов из инконеля [4]. Как видно, в широком диапазоне частот спектральные характеристики меняются всего на 2,5 %. Поэтому требуется высокая точность измерения проводимости в процессе контроля. На рис. 10.3 приведены результаты реконструкции функции послойного распределения напряжений, полученные путем обращения АЕСС спектров упрощенным и итерационным способами соответственно.

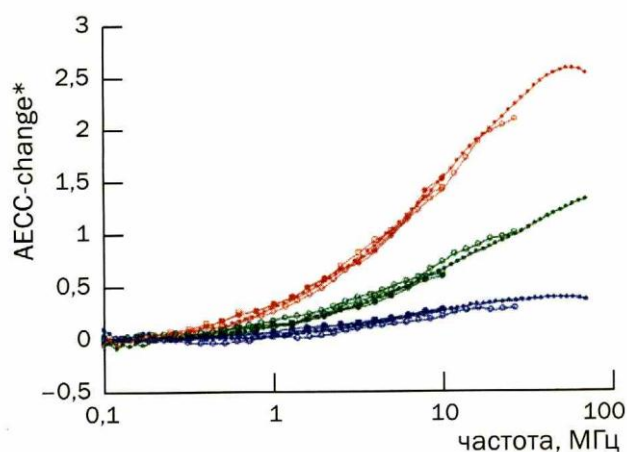


Рис. 10.2. АЕСС спектры в инконеле IN718 для обработанных ППД образцов с различными величинами числа Альмена, изготовленных в различных лабораториях США [4]

Необходимость решения обратной задачи (без ограничения способа решения) для реконструкции послойного распределения свойств ПС в дальнейшем была независимо подтверждена и развита во многих работах. Применение методов обращения данных для исследования свойств ПС успешно использовано, например, для магнитного [5, 6], вихретокового [7] и ультразвукового [8] методов. Список может быть многократно расширен. Один из наиболее успешных результатов применения обратных задач описан в ряде работ Г. Саббаха для решения проблемы реконструкции свойств многослойных покрытий тепловой защиты шатлов (рис. 10.4) вихретоковым методом. Послойный анализ реализован также в рамках теплового, рентгеновского и СВЧ методов.

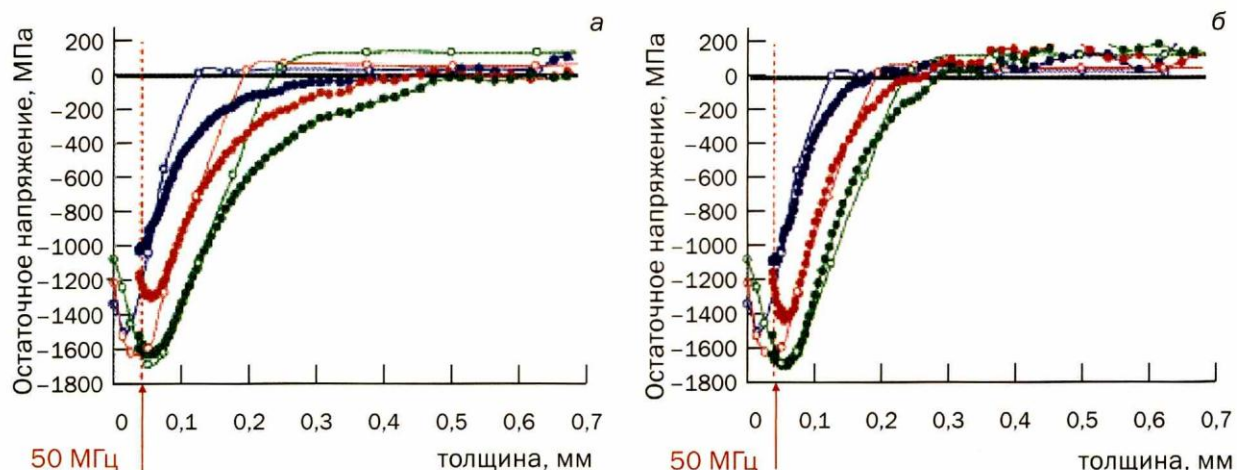


Рис. 10.3. Результаты реконструкции послойного распределения напряжений в образцах инконеля с различными величинами числа Альмена (точки – результаты прямых измерений напряжения):
 а – упрощенным методом; б – итерационным

Обедненная β -фазой зона 2 (Al_2O_3)	Наименование образца	Расположение покрытия	Наименование покрытия	Средняя толщина (микроны)	Вычисленная толщина (микроны)
Алюминид — β -фаза Алюминид	1950F-1000 циклов (Голубой 4)	Верхняя сторона	Внутренняя диффузия	25,8	26,4
			Внутренний, обедненный на бета-фазу, слой	34,0	33,0
			Зона бета-фазы	62,6	63,8
Обедненная β -фазой зона 1		Нижняя сторона	Наружный, обедненный на бета-фазу, слой	37,5	41,5
Зона взаимной диффузии			Внутренняя диффузия	23,7	25,0
			Внутренний, обедненный на бета-фазу, слой	38,1	40,1
Подложка из GTD-11		Зона бета-фазы	52,6	53,0	
		Наружный, обедненный на бета-фазу, слой	33,2	34,8	

Рис. 10.4. Состав четырехслойного покрытия тепловой защиты шаттла США и результаты реконструкции толщин четырех слоев покрытия и сравнение их с измеренными значениями [7]

[Вернуться в оглавление](#)

10.2. Магнитные меандровые магнетометры, MWM

Магнитные меандровые магнетометры (MWMTM), созданные в Массачусетском технологическом институте (США), – это

плоские гибкие пленочные вихретоковые сенсоры для исследования свойств поверхностных слоев проводящих материалов [9–11]. Уникальность новой технологии состоит также в использовании так называемых грид-диаграмм, по существу, голографических четырехпараметровых диаграмм, позволяющих инвертировать измеряемые значения амплитуды и фазы электромагнитного импеданса в значения электрической проводимости или магнитной проницаемости (рис. 10.5).

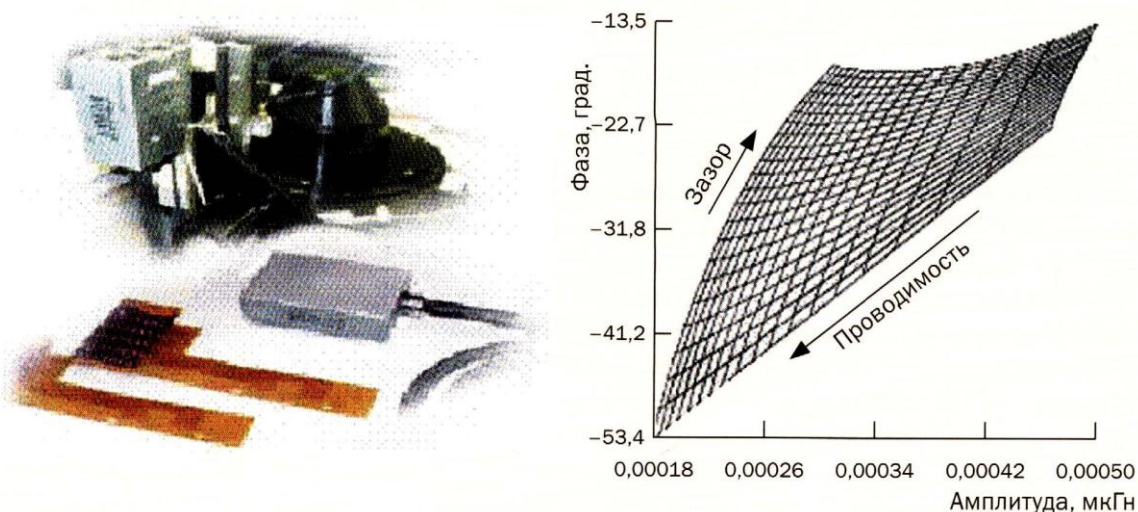


Рис. 10.5. Четырехпараметровые грид-диаграммы, позволяющие инвертировать измеряемые значения электромагнитного импеданса в значения электрической проводимости

Применяемые вплоть до температур 120 °С, MWM сенсоры изготавливаются на тонкой гибкой основе, в результате чего они адаптируются почти к любой поверхности. Информативная глубина зависит от частоты возбуждения и меняется в диапазоне от долей микрона до нескольких долей миллиметра. Сенсоры, производимые с помощью пленочных технологий, обеспечивают отличную воспроизводимость и разрешающую способность. MWM сенсоры и MWM-матрицы калибруются на воздухе, что позволяет использовать их в качестве высокоточных измерителей абсолютных значений проводимости. Аппаратура позволяет производить параллельный опрос всех элементов матрицы, избегая мультиплексирования и во много раз ускоряя измерительную процедуру, а также позволяя цветную визуализацию измеренных значений проводимости одновременно на больших поверхностях.

Разработчик технологии – компания JENTEK – решила большое число прикладных задач по исследованию и диагностике поверхностных слоев.

Распределение нормализованной магнитной проницаемости на поверхности низколегированной стальной пластины в процессе ее деформации растяжением до разрушения получено MWM-матрицей на разных частотах [12] (рис. 10.6). Подобные изображения электрической проводимости на разных частотах получают для любых поверхностных слоев в проводящих материалах.

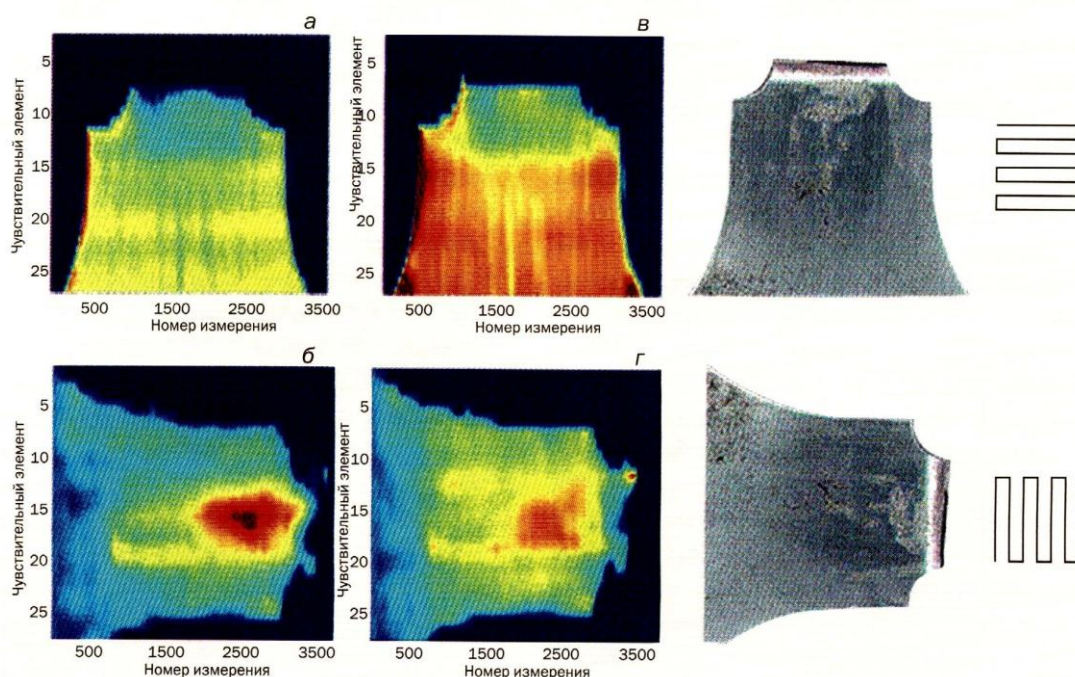


Рис. 10.6. Распределение нормализованной магнитной проницаемости на поверхности малолегированной стальной пластины в процессе ее деформации растяжением до разрушения. Изображения получены MWM-матрицей на частоте 1 МГц (а, б) и 158 кГц (в, г).

Ориентации витков по отношению к образцам показаны справа [12]

[Вернуться в оглавление](#)

10.3. Контроль поверхностных слоев, упрочненных концентрированными источниками теплоты

Ориентация машиностроительных производств на расширенное использование различных видов поверхностных упрочняющих технологий, в частности, концентрированными источниками теплоты (лазерными, электронно-лучевыми и плазменными)

ми), требует высокочувствительных средств контроля. Впервые этот вопрос рассмотрен в работах [13, 14]. Эффективность этой технологии в дальнейшем неоднократно подтверждалась. При использовании этого, а также любых других методов важнейшими остаются вопросы локальности и толщина информативного слоя преобразователя, чувствительность метода к структуре материала и внутренним напряжениям с разрешением по глубине, селективность по отношению к другим влияющим факторам. Как было показано в работе [15], магнитные шумы в наибольшей степени удовлетворяют этим требованиям. Ход фазовых превращений при больших скоростях нагрева (при лазерном нагреве они достигают сотен тысяч градусов в секунду) резко отличается от того, который имеет место при медленном нагреве: критический интервал превращений (рекристаллизация, фазовая перекристаллизация) смещается в область высоких температур пропорционально корню квадратному из скорости нагрева. Поэтому даже при температурах, близких к температуре плавления, обычные гетерогенные диффузионные процессы могут не реализоваться, а, значит, структура упрочненных слоев и их толщина определяются не только фронтом теплопроводности. Поэтому косвенный контроль тепловыми методами по температуре в данном случае неприемлем. Большие трудности при контроле возникают из-за нестабильности условий закалки (мощность излучения, скорость сканирования, удельное тепловложение, диаметр светового пятна, расфокусировка, краевые эффекты), степени однородности исходной структуры, флуктуации коэффициента поглощения из-за различий состояния поверхности (коррозия, окалина, загрязнение, повреждения). Все это предъявляет специфические требования к методу контроля.

Для повышения разрешающей способности метода контроля необходимо уменьшать диаметр преобразователя. На рис. 10.7 приведены результаты сканирования преобразователем Баркгаузена (профилограммы) диаметром $d = 6,5$ мм поперек дорожек лазерно-упрочненных слоев (ЛУС) в стали У10 при различных отношениях l/d , где $l = 16$ мм – ширина дорожки ЛУС (намагничивание вдоль ЛУС). Видно, что только при отношении $l/d > 2,5$ удается с достаточной точностью определить ширину дорожки, тогда как фактическая глубина может быть достоверно измерена

при $l/d > 1$.

Следует сказать и о возможности определения донного профиля ЛУС при сканировании. На рис. 10.7 снизу показаны пять профилограмм относительной величины интенсивности магнитного шума поперек дорожки ЛУС после последовательного электролитического травления поверхности. Достоверность воспроизведения донного профиля значительно возрастает при уменьшении толщины ЛУС.

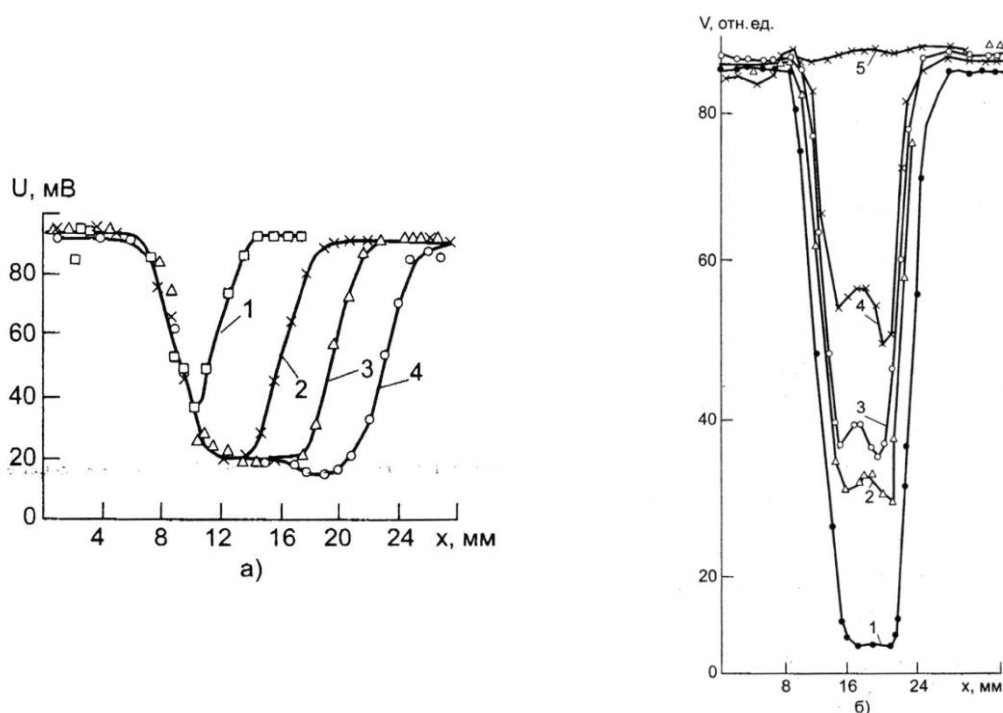


Рис. 10.7. Результаты сканирования преобразователем Баркгаузена (профилограммы) диаметром $d = 6,5$ мм поперек дорожек ЛУС в стали У10 при l/d , равном 0,62 (1), 1,25 (2), 1,85 (3), 2,46 (4) (а), и профилограммы поперек дорожки ЛУС после последовательного электролитического травления поверхности при δ , равном 750 (1), 382 (2), 312 (3), 172 (4) и 0 (5) мкм (б)

Аналогичные проблемы возникают также при сходных способах воздействия на поверхность, в результате которых возникают поверхностные повреждения, например, прижоги или повышенный износ, при контроле которых необходимо учитывать упомянутые и другие специфические особенности ЛУС. Например, при выявлении шлифовочных прижогов необходимо провести предварительный анализ природы этого прижога, в частности, оценить, является ли прижог в данном материале прижогом отпуска или закалки. В противном случае можно получить ре-

зультаты с точностью до «наоборот». Предварительно оценить возможности измерения параметров ЛУС можно с помощью формулы [2].

$$\gamma = 1 - S_3 / S_D (1 - h)(1 - e^{-\alpha\delta}),$$

где $\gamma = V/V_H$ – нормированное значение сигнала магнитного шума; $V_H = V_H^0 S_D / \beta$ – сигнал при $\delta \neq 0$; α и β – коэффициенты затухания шума в упрочненном слое и основном металле соответственно; V_H^0 – величина сигнала при $\delta = 0$ (отсутствие закалки); S_D – площадь датчика; S_3 – площадь зоны упрочнения, перекрываемой датчиком; $h = V_3/V_H$ – отношение сигналов магнитного шума от упрочненной структуры и неупрочненной основы соответственно.

[Вернуться в оглавление](#)

10.4. Некоторые подходы к контролю усталости ферромагнитных материалов

Усталость металла всегда ведет к поверхностному разупрочнению. На последних стадиях усталости примеси и дефекты структуры сегрегируют на поверхности, образуя последовательно линии скольжения, полосы скольжения, поверхностные ступеньки, каверны и трещины. Таким образом, роль поверхности в «сценарии» усталостной деградации очень велика. С другой стороны, структурная перестройка в процессе усталости недостаточна, чтобы вызвать значительные изменения физических характеристик, измеряемых при НК: электропроводности, магнитной проницаемости, скорости ультразвука и т. п. Поэтому в течение многих лет надежная диагностика усталости на ранних ее стадиях представляет значительные трудности. Заметный прогресс достигнут при изучении фрактальных характеристик магнитного шума [16] во взаимосвязи с изменением мезоструктуры стали. Показано, что фрактальная размерность шума в процессе накопления усталостных повреждений монотонно возрастает и может количественно характеризовать стадии усталости; Другой подход [17] основан на измерениях послойного распределения параметров магнитного шума (рис. 10.8). Послойные измерения

производили после последовательного удаления слоев методом электролитического травления. Основной вывод состоит в том, что по мере усталостной деградации металла различие свойств слоев, находящихся на разной глубине от поверхности, возрастает в несколько раз. Таким образом, прогресс в НК усталости может быть достигнут, если удастся дифференциально измерять разность поверхностных и подповерхностных свойств магнитного шума.

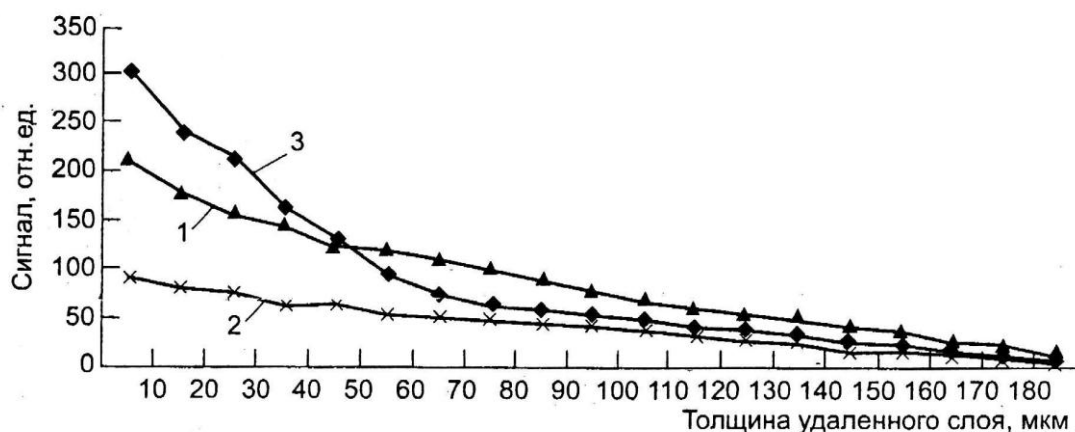


Рис. 10.8. Зависимость сигнала магнитного шума от толщины удаленного электрополировкой слоя после различных стадий циклирования пластины мартенситно-старящего сплава ВНС-2 до циклирования (1), после 18 000 (2) и 40 000 (3) циклов (появление трещины)

[Вернуться в оглавление](#)

10.5. Новый взгляд на капиллярную дефектоскопию

Капиллярная дефектоскопия (КД) – традиционный метод выявления дефектов поверхностных слоев. Критическими вопросами всегда оставались недостаточный контраст при выявлении очень мелких дефектов, проблемы калибровки и метрологии, недостаточная производительность. Хотя повседневная практика КД мало изменилась за последние годы, в научном продвижении достигнуты значительные успехи.

Прежде всего была впервые построена теория гидродинамических процессов, лежащих в основе методов контроля проникающими жидкостями [18]. В нескольких направлениях наметился значительный прогресс. Приведем кратко его основные составляющие:

– обнаружено новое явление: двустороннее заполнение жидкостью погруженного в нее тупикового конического капилляра [19]. При этом жидкость заполняет канал капилляра не только со стороны его входа, но и со стороны его тупика, т. е. из не имеющей прямого контакта с жидкостью вершины капилляра. В ряде случаев к моменту полного заполнения жидкостью конического канала объем этого внутреннего столбика существенно превышает объем классического столбика, проникающего из устья капилляра, что означает преимущественное заполнение канала со стороны тупика. Очевидно, что такое явление, влияющее на полноту заполнения пенетрантом полости поверхностного микродефекта, может сильно влиять на чувствительность капиллярного контроля. Позднее было показано [20], что механизм двустороннего заполнения тупиковых конических капилляров, основанный на перетекании полярной жидкости вдоль тонкой пленки от внешнего мениска к внутреннему, хорошо объясняет основные качественные особенности этого явления и приводит к количественным результатам, которые удовлетворительно согласуются с экспериментом;

– разработка средств количественной оценки как результатов капиллярного контроля, так и уровней чувствительности наборов дефектоскопических материалов. Около 10 лет назад учеными Института прикладной физики НАН Беларуси совместно с коллегами из Федерального института исследований и испытаний материалов (Берлин, Германия) разработан и с тех пор успешно используется программно-аппаратный комплекс, позволяющий регистрировать, распознавать и количественно анализировать видеоизображения индикаторных следов при капиллярном контроле. Предложены алгоритмы и соответствующее программное обеспечение для комплексной оценки геометрических и оптических характеристик индикаторных рисунков дефектов, выявленных на контролируемой поверхности;

– новое направление связано с использованием тепловых воздействий на стадиях применения проникающей жидкости и проявителя с целью повышения чувствительности и производительности капиллярного НК. Установлено, что использование нагрева объектов до температур, превышающих начальные на 20–40 °С, на основных стадиях контроля позволяет снизить порог

чувствительности до 2 раз по сравнению со стандартной технологией контроля и приводит к сокращению оптимальной продолжительности пропитки дефектов с нескольких часов до нескольких минут;

– хорошие перспективы у метода электрохимической обработки поверхности (ЭХО). При ЭХО происходит интенсивное растворение поверхностного слоя металла без пластического деформирования последнего, что обеспечивает раскрытие устьев дефектов и их хорошую выявляемость при капиллярном контроле;

– установлено влияние на чувствительность и производительность капиллярного контроля полярности пенетранта, которая существенно (до 67 % для исследованных пенетрантов) замедляет течение его пленки при двустороннем заполнении конических пор и трещин. Показано, что величины сдвиговой вязкости μ^H , полярности, характеризуемой относительной диэлектрической проницаемостью ε , а также микроструктурных параметров k и δ^0 применяемого для дефектоскопии пенетранта при прочих равных условиях могут оказывать значительное влияние на результаты контроля. Рекомендовано выбирать полярный пенетрант, значение диэлектрической постоянной которого $17 < \varepsilon < 25$.

Описанные результаты исследований позволяют существенно повысить эффективность методов контроля проникающими веществами.

[Вернуться в оглавление](#)

10.6. Контроль наноразмерных поверхностных дефектов

В данной работе не рассматриваются многочисленные методы контроля поверхностных наноструктур: атомная силовая, оптическая электронная и рентгеновская микроскопии. Однако об одном методе контроля наноразмерных поверхностных структур следует упомянуть. Речь идет о вихретоковой визуализации с помощью атомного силового микроскопа (АСМ) [21]. Обычное пространственное разрешение вихретоковых дефектоскопов ограничено размерами датчика, которые обычно превышают 500 мкм. Однако в комбинации вихретокового метода и АСМ при визуализации локальных изменений электрической проводимости на поверхности изделий удастся достичь субмикронного раз-

решения. На рис. 10.9 приведены топографические изображения упрочняющих углеродных волокон в полимерной матрице, полученные с помощью атомного силового микроскопа и вихретокового АСМ.

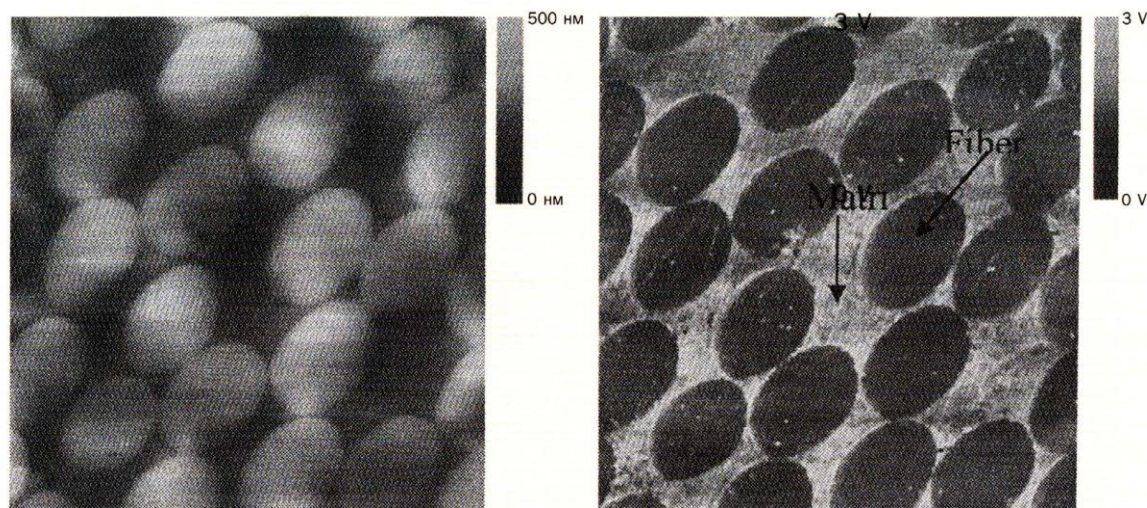


Рис. 10.9. Топографическая визуализация упрочняющих углеродных волокон на поверхности полимерной матрицы, полученная: слева – с помощью атомного силового микроскопа (АСМ), справа – вихретокового АСМ

Высокое разрешение около нескольких нанометров достигается за счет нанесения магнитной пленки на обычный наконечник АСМ из нитрида кремния диаметром 10 нм, прижимающийся с усилием 0,1 Н/м. Изделие устанавливают на катушку, возбуждаемую от источника переменного тока с частотой 50–500 кГц. Магнитное поле, генерируемое катушкой, заставляет осциллировать магнитный наконечник и, соответственно, консоль АСМ, движение которой регистрируется прибором. Комбинация традиционного метода НК и новых систем для исследования субмикронных структур может оказаться весьма перспективной при исследовании новых материалов и методов поверхностного упрочнения.

В данном пособии рассмотрен субъективный взгляд авторов и ряда ведущих ученых на тенденции развития толщинометрии. Здесь изложены некоторые представления о проблемах, которые ставит перед этой областью НК современный уровень развития технологий обработки поверхности материалов: повышение избирательной чувствительности к типу дефектов; повышение разрешающей способности до субмикронных величин; необходи-

мость диагностики поверхностных слоев с разрешением свойств по глубине; диагностика многослойных многокомпонентных покрытий, поверхностных слоев, обработанных концентрированными источниками энергии.

[Вернуться в оглавление](#)

10.7. Контрольные вопросы

1. Что лежит в основе послойного анализа ферромагнетиков?
2. Что представляют собой магнитные меандровые магнетометры?
3. До какой температуры применяют MWM сенсоры?
4. Как осуществляется контроль поверхностных слоев, упрочненных концентрированными источниками теплоты?
5. К чему всегда ведет усталость металла?
6. Что такое капиллярная дефектоскопия?
7. Как осуществляется контроль наноразмерных поверхностных дефектов?

[Вернуться в оглавление](#)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vengrinovich, V. L. The principles of depth analysis of surface hardened layers by magnetic noise method / V. L. Vengrinovich, M. A. Knyazev, A. L. Vishnevsky // Research in NDE. – 1992. – Vol. 4. – N 1. – P. 19027.
2. Венгринович, В. Л. Магнитошумовая структуроскопия. – Минск: Навука і тэхжка, 1991. – 285 с.
3. Арсенин, В. Я. Методы математической физики и специальные функции. – М.: Наука, 1984. – 384 с.
4. Abu-Nabah, B. A. Electromagnetic Techniques for Residual Stress Measurements / B. A. Abu-Nabah, F. Yu, P. B. Nagy // Lecture made in 1 Workshop on Residual Stress Measurements. Cincinnati: Dept. Aerospace Eng. & Eng. Mechanics, University of Cincinnati, 2006.
5. Bruno, A. C. Imaging flaws in magnetically permeable structures using the truncated generalized inverse on leakage fields // J. Appl. Phys. 1997. – Vol. 82. – N 12. – P. 5899–5906.
6. Vengrinovich, V. L. 2D flaw image restoration from magnetic leakage field data using singular value decomposition and Bayesian techniques / V. L. Vengrinovich, S. A. Emelyanenko, G. R. Tillack // 9th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE 2003), CEA Saclay, France, 2003.
7. Sabbach, H. A. Assessing thermal barrier coatings by eddy-current inversion / H. A. Sabbach, E. H. Sabbach, R. K. Murthy, J. Nyenhuis / Ed. by D. Thompson, D. Chimenti // Rev. of Progress in QNDE. – 2002. – Vol. 22. – P. 722–727.
8. Баев, А. Р. Ультразвуковой метод анализа поверхностного упрочнения металлических изделий / А. Р. Баев, А. Л. Майоров, М. А. Тищенко // Литье и металлургия. – 2010. – № 4. – С. 167–271 с.
9. Goldfine, N. J. et al. Scanning and Permanently Mounted Conformable MWM Eddy Current Arrays for Fatigue / Corrosion Imaging and Fatigue Monitoring // USAF ASIP Conf., San Antonio, 2000.
10. Goldfine, N. J. et al. Surface Mounted Periodic Field Eddy Current Sensors for Structural Health Monitoring // SPIE Conf. Smart Structures and Materials, NDE for Health Monitoring and Diagnosis. Newport Beach, 2001.
11. Zilberstein, V. MWM Eddy Current Sensors for Monitoring of Crack Initiation and Growth during Fatigue Tests and in Service /

V. Zilberstein, D. Schlicker, K. Walrath et al. // *Internat. J. Fatigue.* – 2001. – Vol. 23. – P. S477–S485.

12. Zilberstein, V. Residual and Applied Stress Estimation from Directional Magnetic Permeability Measurements with MWM Sensors / V. Zilberstein, M. Fisher, D. Grundy et al. // *ASME J. Pressure Vessel Technology.* – 2002. – April. – P. 127–136.

13. Особенность неразрушающего контроля структурных зон лазерного упрочнения / В. Л. Венгринович, С. А. Астапчик, В. Б. Бабушкин [и др.] // *Физика и химия обработки материалов.* – 1984. – №7. – С. 10–15.

14. Контроль параметров лазерно-упрочненных слоев ферромагнитных материалов методом эффекта Баркгаузена / В. Л. Венгринович, В. П. Якунин, С. Д. Леготин, В. Н. Бусько // *Дефектоскопия.* – 1986. – №2. – С. 87–89.

15. Леготин, С. Д. Контроль параметров лазерно-упрочненных слоев ферромагнитных материалов методом эффекта Баркгаузена // *Дис. канд. техн. наук.* – Минск, 1989. – 126 с.

16. Screiber, J. Use of the Fractal nature of spatial and temporal response behavior for materials damage characterization / J. Screiber, U. Cikalova, Ye. Vertyagina // *6th Int. Conf. on Low Cycle Fatigue / Special Issue.* Berlin, 2007. – P. 655–660.

17. Vengrinovich, V. L. New approach to fatigue damage evaluation via Barkhausen noise / V. L. Vengrinovich, V. N. Busco // URL: http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_01_10.pdf.

18. Прохоренко, П. П. Введение в теорию капиллярного контроля / П. П. Прохоренко, Н. П. Мигун. – Минск: Наука и техника, 1988. – 207 с.

19. Довгялло, Г. И. О полном заполнении жидкостью тупиковых конических капилляров / Г. И. Довгялло, Н. П. Мигун, П. П. Прохоренко // *Инженерно-физический журнал.* – 1989. – Т. 56. – № 4. – С. 563–565.

20. Мигун, Н. П. Модель пленочного течения в тупиковом коническом капилляре / Н. П. Мигун, А. И. Шнил // *Инженерно-физический журнал.* – 2002. – Т. 75. – № 6. – С. 145–150.

21. High resolution eddy current imaging with atomic force microscope / V. Nalladega, S. Sathish, K. V. Yata, et. al. // *Rev. of Progress in QNDE.* – 2008. – P. 400–405.

[Вернуться в оглавление](#)