

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра технологии металлов

## СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Лабораторный практикум*

Минск  
БГАТУ  
2011

УДК 620.22(07)  
ББК 30.3я7  
С56

*Рекомендовано научно-методическим советом  
факультета «Технический сервис в АПК» БГАТУ.  
Протокол № 7 от 27 октября 2009 г.*

Авторы:

заведующий кафедрой «Технология металлов» БГАТУ,  
доктор технических наук, профессор *В. М. Капцевич* (лаб. раб. 3, 4, 6);  
доцент кафедры «Технология металлов» БГАТУ,  
кандидат технических наук *В. Р. Калиновский* (лаб. раб. 1–4, 6);  
профессор кафедры «Технология металлов» БГАТУ,  
доктор физико-математических наук *Н. К. Толочко* (лаб. раб. 5);  
старший преподаватель кафедры «Технология металлов» БГАТУ  
*Д. И. Кривальцевич* (лаб. раб. 6);  
старший преподаватель кафедры «Технология металлов» БГАТУ  
*В. К. Корнеева* (лаб. раб. 3);  
профессор кафедры «Технология металлов» БГАТУ,  
доктор технических наук *А. Ф. Ильющенко* (лаб. раб. 3, 4)

Рецензенты:

доцент кафедры «Сопrotивление материалов и детали машин» факультета  
«Технический сервис в АПК» БГАТУ, кандидат технических наук *К. В. Сашко*;  
первый заместитель директора – заместитель директора по науке,  
кандидат технических наук ГНУ «Институт порошковой металлургии» *В. В. Савич*

С56 **Современные материалы** : лабораторный практикум /  
В. М. Капцевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2011. – 184 с.  
ISBN 978-985-519-410-2.

Издание содержит методические указания к лабораторным занятиям по разделу «Поверхностное упрочнение материалов и упрочняющие покрытия» дисциплины «Упрочняющие технологии», также методические рекомендации к выполнению управляемых самостоятельных работ.

Практикум предназначен для студентов, обучающихся по специальности 1-74 06 03 «Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве».

УДК 620.22(07)  
ББК 30.3я7

ISBN 978-985-519-410-2

© БГАТУ, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 1 ВЫБОР СТАЛЕЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	4
Лабораторная работа 2 ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ЕЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ.....	41
Лабораторная работа 3 ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, СВОЙСТВ, ПРИМЕНЕНИЯ И СТРОЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ .....	56
Лабораторная работа 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ .....	102
Лабораторная работа 5 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВ .....	118
Лабораторная работа 6 ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МИКРОСТРУКТУРЫ НАПЛАВЛЕННЫХ И НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ .....	131
Методические рекомендации к выполнению управляемой самостоятельной работы 1 ПОЛУЧЕНИЕ, СТРОЕНИЕ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАСТМАСС.....	155
Методические рекомендации к выполнению управляемой самостоятельной работы 2 КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	161
Методические рекомендации к выполнению управляемой самостоятельной работы 3 МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ .....	165
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	168

## Лабораторная работа 1

### ВЫБОР СТАЛЕЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Цель работы:* изучить методику выбора сталей для деталей машин, классификацию, маркировку, свойства и область применения сталей; ознакомиться с сортаментом и назначением различных групп проката; приобрести практические навыки в выборе материала при проектировании технологических процессов исходя из заданных условий.

*Студент должен знать:* принципы выбора сталей для деталей машин, классификацию и области применения различных марок сталей;  
*уметь:* выбрать марку стали для деталей, работающей в конкретных условиях эксплуатации, и назначить режим термической обработки для готовой детали.

#### Общие сведения

В производстве в современном машиностроении и сельхозмашиностроении нашли применение следующие конструкционные материалы: сталь, чугун, цветные металлы и сплавы, спеченные материалы, пластмассы, дерево, техническая резина, а также различные виды покрытий. Выбор материала в первую очередь определяется условиями эксплуатации.

Детали машин и приборов, передающих нагрузку, должны обладать жесткостью и прочностью, достаточными для ограничения упругой и пластической деформации при гарантированной надежности и долговечности. Из многообразия материалов в наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют сплавы на основе железа – особенно стали. Стали обладают высоким, наследуемым от железа, модулем упругости ( $E = 2,1 \times 10^6$  МПа) и, тем самым, высокой жесткостью, уступая в этом лишь бору, вольфраму, молибдену, бериллию, которые из-за высокой стоимости используются только в специальных случаях. Высокая жесткость и доступность обуславливают широкое применение сталей для изготовления строительных металлоконструкций, корпусных деталей, ходовых винтов станков, различных валов, зубчатых колес и многих других деталей машин. Высокую жесткость стали сочетают с достаточной статической и циклической прочностью, значе-

ние которой можно регулировать в широком диапазоне изменением концентрации углерода, легирующих элементов и технологии термической и химико-термической обработки.

Применяемые в технике сплавы на основе меди, алюминия, магния, титана, а также пластмассы уступают стали по жесткости, прочности или надежности. Кроме комплекса этих важных для работоспособности деталей свойств, стали могут обладать и рядом других ценных качеств, делающих их универсальным материалом. При соответствующем легировании и технологии термической обработки сталь становится износостойкой, либо коррозионно-стойкой, либо жаростойкой и жаропрочной, а также приобретает особые магнитные, тепловые или упругие свойства. Стали также характеризуются хорошими технологическими свойствами.

Вследствие этих достоинств, сталь – основной металлический материал промышленности. Большое разнообразие химического состава стали позволяет получать различные свойства сталей и удовлетворять запросы многих отраслей техники.

Выбор материала для конкретного изделия определяется следующими основными факторами:

- служебным назначением детали; например, для почвообрабатывающих орудий необходим износостойкий материал, а для трущихся поверхностей – антифрикционный и т. п.;

- способом ее соединения с другими деталями; например, не следует соединять детали из алюминиевых сплавов стальными деталями крепежа, так как это приводит к быстрому разрушению алюминиевых изделий из-за активной электрохимической коррозии;

- условиями получения заготовки, а из нее – детали; например, для деталей, получаемых гибкой из листа, усилие гибки должно быть выше предела текучести  $\sigma_t$  материала, но ниже предела прочности  $\sigma_b$ , а при резке на прессовых штампах усилие прессы должно превышать  $\sigma_b$  и т. д.;

- конфигурацией изделия; например, детали сложной конфигурации предпочтительнее получать литьем, следовательно, для таких деталей необходимы материалы, позволяющие получать качественные отливки: сталь, чугун, силумины и т. д.

- при выборе заготовки следует широко использовать прокат, сортамент которого весьма разнообразен (прил. 1).

Кроме того, приступая к выбору материала, необходимо учитывать, что, в общем случае, черные сплавы дешевле цветных. Если в требованиях к изделию не содержится особых условий, то должен

быть выбран такой материал, стоимость которого минимальна. Здесь также следует помнить, что при массовом и крупносерийном способе производства выгоднее применить литье и штамповку, а при мелкосерийном и индивидуальном – обработку резанием.

Таким образом, выбор материала есть многовариантная задача.

## Классификация сталей

*Сталью называется сплав железа с углеродом (до 2,14 % С). Кроме углерода, в стали содержатся постоянные примеси (кремний, марганец, фосфор и сера).*

Углерод является важнейшей примесью, определяющей механические, физические, химические, технологические и эксплуатационные свойства стали. Углерод определяет структуру стали и, соответственно, вызывает значительное изменение ее свойств. С увеличением в стали углерода увеличиваются предел прочности при растяжении  $\sigma_b$  и твердость по Бринеллю, *HB*, уменьшаются относительное удлинение  $\delta$ , относительное сужение  $\psi$ , ударная вязкость *KCU* и плотность  $\gamma$ , увеличивается удельное электросопротивление  $\rho$ .

Кремний в углеродистой стали не превышает 0,4 %. Он растворяется в феррите, повышает прочность, твердость, упругость, снижает пластичность стали, а главное – хорошо раскисляет ее.

Марганец в углеродистой стали составляет 0,25–0,80%. Он раскисляет сталь, растворяется в феррите и частично образует карбиды, и этим самым повышает прочность, твердость, упругость, снижает пластичность стали.

Содержание фосфора в стали не должно превышать 0,05%. Растворяясь в феррите, он резко снижает его пластичность и вызывает хладноломкость.

Сера в стали не превышает 0,05 %. Она нерастворима в феррите, но образует сульфид железа FeS, который вызывает красноломкость стали.

Стали классифицируются *по способу производства, назначению, химическому составу, структуре и качеству.*

*По назначению* различают конструкционные, инструментальные и специальные стали. Конструкционные стали объединяют: машиностроительные, машиностроительные специального назначения, строительные.

Специальные стали: специальные с особыми физическими свойствами и специальные с особыми химическими свойствами.

По химическому составу различают углеродистые и легированные стали, по содержанию углерода – малоуглеродистые (до 0,25 % С), среднеуглеродистые (0,25–0,60 % С), высокоуглеродистые (0,60–1,3 % С).

По качеству стали классифицируют на стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные, содержащие соответственно фосфора и серы в суммарном количестве не более 0,10, 0,08 и 0,05 %.

По прочности, оцениваемой временным сопротивлением, конструкционные стали с некоторой условностью можно разделить на стали нормальной (средней) прочности ( $\sigma_b \sim$  до 1000 МПа), повышенной прочности ( $\sigma_b \sim$  до 1500 МПа) и высокопрочные ( $\sigma_b \sim$  более 1500 МПа).

Легированной называется сталь, содержащая один или несколько специально вводимых элементов, заметно изменяющих ее структуру и свойства.

Низколегированные стали содержат в сумме до 3% легирующих элементов, среднелегированные – от 3 до 10%, высоколегированные – свыше 10%. По структуре легированные стали подразделяют на 5 классов: ферритный, перлитный, аустенитный, мартенситный и карбидный.

Легирующие элементы вводят для повышения конструкционной прочности стали. Легированные стали производят качественными, высококачественными или особовысококачественными. Их применяют после закалки и отпуска, поскольку в отожженном состоянии они по механическим свойствам практически не отличаются от углеродистых.

Улучшение механических свойств обусловлено влиянием легирующих элементов на свойства феррита, дисперсность карбидной фазы, устойчивость мартенсита при отпуске, на прокаливаемость, размер зерна.

### **Маркировка и применение углеродистых сталей**

Углеродистые стали делятся на конструкционные и инструментальные. Конструкционные углеродистые стали, в свою очередь, делятся на стали обыкновенного качества и качественные.

### **Углеродистые стали обыкновенного качества**

Углеродистая сталь обыкновенного качества предназначена для изготовления горячекатаного проката: сортового, фасонного, толстолистового, тонколистового, широкополосного и холоднокатаного тонколистового, а также слитков, блюмов, слябов, заготовки катаной и непрерывнолитой, труб, поковок и штамповок, лент, проволоки, метизов и др.

Углеродистая сталь обыкновенного качества в соответствии с ГОСТ 380-2005 маркируется буквами «Ст», что обозначает «Сталь» и цифрой (от 0 до 6), которая обозначает условный номер марки в зависимости от химического состава. Стоящие после цифры буква «Г» (в некоторых марках) и буквы «кп», «пс», «сп» обозначают: буква «Г» – марганец при его массовой доле в стали 0,80% и более, буквы «кп», «пс», «сп» – степень раскисления стали: «кп» – кипящая, «пс» – полуспокойная, «сп» – спокойная.

Раскисление – процесс удаления из жидкого металла кислорода, проводимый для предотвращения хрупкого разрушения стали при горячей деформации.

Спокойные стали раскисляют марганцем, кремнием и алюминием. Они содержат мало кислорода и затвердевают спокойно без газовыделения. Кипящие стали раскисляют только марганцем. Перед разливкой в них содержится повышенное количество кислорода, который при затвердевании, частично взаимодействуя с углеродом, удаляется в виде СО. Выделение пузырей СО создает впечатление кипения стали, с чем и связано ее название. Кипящие стали дешевы, их производят низкоуглеродистыми и практически без кремния (менее 0,07 %), но с повышенным количеством газообразных примесей.

Полуспокойные стали по степени раскисления занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими.

Химический состав стали (основные элементы) по анализу ковшевой пробы должен соответствовать нормам, указанным в табл. 1.

Таблица 1

## Химический состав стали

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %		
	углерода	марганца	кремния
Ст 0	Не более 0,23	–	–
Ст 1кп	0,06–0,12	0,25–0,50	Не более 0,05
Ст 1пс	0,06–0,12	0,25–0,50	0,05–0,15
Ст 1сп	0,06–0,12	0,25–0,50	0,15–0,30
Ст 2кп	0,09–0,15	0,25–0,50	Не более 0,05
Ст 2пс	0,09–0,15	0,25–0,50	0,05–0,15
Ст 2сп	0,09–0,15	0,25–0,50	0,15–0,30
Ст 3кп	0,14–0,22	0,30–0,60	Не более 0,05
Ст 3пс	0,14–0,22	0,40–0,65	0,05–0,15
Ст 3сп	0,14–0,22	0,40–0,65	0,15–0,30
Ст 3Гпс	0,14–0,22	0,80–1,10	Не более 0,15
Ст 3Гсп	0,14–0,20	0,80–1,10	0,15–0,30
Ст 4кп	0,18–0,27	0,40–0,70	Не более 0,05
Ст 4пс	0,18–0,27	0,40–0,70	0,05–0,15
Ст 4сп	0,18–0,27	0,40–0,70	0,15–0,30
Ст 5пс	0,28–0,37	0,50–0,80	0,05–0,15
Ст 5сп	0,28–0,37	0,50–0,80	0,15–0,30
Ст 5Гпс	0,22–0,30	0,80–1,20	Не более 0,15
Ст 6пс	0,38–0,49	0,50–0,80	0,05–0,15
Ст 6сп	0,38–0,49	0,50–0,80	0,15–0,30

Примерное назначение конструкционной углеродистой стали обыкновенного качества приведено в табл. 2.

Таблица 2

## Примерное назначение углеродистой стали обыкновенного качества

Марка стали	Примерное назначение
Ст 0 Ст 1кп Ст 1пс Ст 2кп Ст 2пс Ст 3кп	Для изготовления строительных конструкций неответственного назначения: ограждения, прокладки, шайбы. Для изготовления деталей высокой вязкости, не подвергающиеся действию больших напряжений: анкерные болты, гнутые профили. Для арматуры периодического профиля диаметром от 6 до 90 мм. Гайки, клинья, чеки, шпонки, крюки, пластины цепей
Ст 2сп Ст 3пс Ст 3сп Ст 4кп Ст 4пс	Для менее ответственных деталей, рычагов, угольников, щитов, без их термической обработки. Для фасонных специальных профилей. Для деталей средних напряжений: звездочки, шайбы, упоры подшипников, детали, применяемые в термически обработанном состоянии (после нормализации или улучшения)
Ст 3Гсп Ст 4сп Ст 5пс Ст 5сп Ст 5Гпс Ст 6пс Ст 6сп	Кожухи, штампованные детали, шпильки, кулачки зубьев барабанов, шестерен пальцев поршней (при низких удельных давлениях), в термически обработанном состоянии, валы, оси, втулки, фланцы

**Углеродистые качественные стали**

По ГОСТ 1050-88 эти стали делятся на две группы: I-я – с нормальным содержанием Mn (до 0,6 %) и II-я – с повышенным содержанием Mn (0,8–1 %).

Стали I-й группы отличаются от сталей обыкновенного качества пониженным содержанием серы и фосфора (до 0,03 %), а также соблюдением всех металлургических стандартов качества стали (ограниченное содержание газов, неметаллических включений и т. д.).

Максимальное содержание углерода в рассматриваемых сталях – 0,85 %, минимальное – 0,05 %. *Маркируются такие стали*

в соответствии с содержанием углерода в сотых долях процента 05, 08, 10, 15–85. Механические свойства углеродистых качественных сталей представлены в табл. 3.

Окончание табл. 3

Таблица 3  
Механические свойства углеродистых качественных сталей

Марка стали	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_t$ , МПа	$\delta$ , %	Твердость по Бринеллю в состоянии поставки, <i>HВ</i>	Твердость по Бринеллю после отжига, <i>HВ</i>
1	2	3	4	5	6
<i>Группа I</i>					
05кп	–	–	–	–	–
08кп	300	180	35	131	–
08	330	200	33	131	–
10кп	320	190	33	137	–
10	340	210	31	137	–
15кп	360	210	29	143	–
15	380	230	27	143	–
20кп	420	250	25	156	–
20	420	250	25	156	–
25	460	280	23	170	–
30	500	300	21	179	–
35	540	320	20	187	–
40	580	340	19	217	187
45	610	360	16	241	197
50	640	380	14	241	207
55	660	390	13	255	217
60	690	410	12	255	229
65	710	420	10	255	229
70	730	430	9	269	229
75	1100	900	7	285	241
80	1100	950	6	285	241
85	1150	1000	6	302	255

1	2	3	4	5	6
<i>Группа II</i>					
15Г	420	250	26	163	–
20Г	460	280	24	197	–
25Г	500	300	22	207	–
30Г	550	320	20	217	–
35Г	570	340	18	229	197
40Г	600	360	17	229	207
50Г	660	380	15	241	217
60Г	710	420	11	269	229
65Г	750	440	9	285	229
70Г	800	460	8	285	229

Из сталей этой группы изготавливаются самые разнообразные детали, подвергаемые термической и химико-термической обработке. Причем, стали с содержанием углерода до 0,25 %, как известно, не закаляются, а их низкие прочностные свойства не позволяют использовать их для изготовления деталей машин и конструкций без дополнительной упрочняющей обработки. В качестве такой обработки используется холодное деформирование или цементация. Цементованные стали подвергаются еще и закалке с низким отпуском. В результате они имеют высокую твердость поверхности (~60 *HRC* на глубине до 1,5 мм) и не упрочненную сердцевину с высокой пластичностью и вязкостью. Конструкционные качественные стали с более высоким содержанием углерода упрочняются термообработкой – улучшением (закалка и высокий отпуск на сорбитную структуру с твердостью около 25–30 *HRC* соответствующей высокой вязкости).

Стали этой группы нашли широкое применение для изготовления деталей сельхозмашин благодаря не только своим высоким эксплуатационным характеристикам, но и хорошим технологическим свойствам: стали с низким содержанием углерода хорошо штампуются (05, 08, 10, 15кп) и свариваются (10, 15кп, 20кп, 25), а с более высоким – хорошо льются (30Л–70Л).

Цементируемые углеродистые стали (10, 15, 20) после цементации применяют для изготовления деталей относительно небольших размеров, работающих на износ при малых нагрузках, когда прочность сердцевины не влияет на эксплуатационные свойства (втулки,

валы, оси, шпильки и пр.). Из среднеуглеродистых сталей (35, 40, 45) изготавливают детали, испытывающие небольшие напряжения (сталь 35), и детали, требующие повышенной прочности (стали 40, 45). С увеличением сечения детали механические свойства снижаются, так как эти стали обладают низкой прокаливаемостью. Средненагруженные детали из сталей 40, 45, неработающие на износ (тяги, рычаги, шатуны, гайки и проч.) подвергают улучшению. Детали, от которых требуется повышенная твердость (шпиндели, валы, оси, шайбы и т. п.) закаливают и отпускают на твердость 40–50 HRC. Детали, от которых требуется высокая поверхностная твердость, подвергаются закалке с нагревом ТВЧ. Этот способ закалки получил широкое распространение и дал возможность их использовать также для ответственных деталей (коленчатые валы, распределительные валики, звездочки, зубья и др.).

Стали II-й группы с повышенным содержанием Mn (до 1 %) относятся к углеродистым сталям.

Среди конструкционных углеродистых сталей можно выделить несколько функциональных групп сталей со специальными технологическими свойствами.

**Стали для отливок.** Многие машиностроительные предприятия имеют собственные сталелитейные цеха. Специфика такого производства не позволяет выплавлять высококачественные конструкционные стали. Такие стали содержат повышенное количество серы и фосфора (для электростали – до 0,06 %) и имеют в конце маркировки букву «Л»: 20Л, 25Л, 30Л, 35Л, 45Л, 53Л, 65Л, 70Л. Стали этой категории идут на изготовление разнообразных деталей, подлежащих механической и термической обработке. Из них получают, как правило, изделия сложной конфигурации, не испытывающие больших знакопеременных нагрузок и удельных давлений: кронштейны, головки шарниров, звездочки и т. п. При этом многие детали подвергают закалке ТВЧ (звездочки из стали 35Л закаливают на твердость HRC 40–50 на глубину 2–3 мм) или наплавке специальными материалами. Так, например, лемех плуга изготавливается из сталей 53Л или 65Л. Лезвие лемеха закаливается в воде до HRC 47–59, отпуск проводят при 350 °С. Затем для повышения износостойкости лезвия с обеих его сторон наплавляется сплав повышенной твердости толщиной 1,7 мм. Из тех же сталей может изготавливаться и полевая доска корпуса плуга.

**Листовая сталь для глубокой вытяжки.** Для штамповки деталей из тонкого листа с глубокой вытяжкой применяют малоуглеродистую сталь 05кп, 08кп, 10кп. Она отличается уменьшенным содержанием нормальных примесей, особенно Si (до 0,03 %), что значительно повышает пластичность и уменьшает твердость. Данная сталь имеет феррито-перлитную структуру с мелкими включениями перлитных зерен. Выделение третичного цементита по границам зерен в этой стали недопустимо, так как ведет к разрывам при штамповке.

Существенное значение имеет и зернистость стали: лучше всего штампуется сталь с мелким зерном; при штамповке стали с крупным зерном получается шероховатая поверхность (дефект «апельсиновая корка»).

Наиболее употребительной из этой категории сталей является сталь 08кп. Из нее изготавливают кузова автомобилей и тракторов, крылья, фасонные панели, семяпроводы сеялок, бункера зерноуборочных комбайнов, различные крышки и колпаки для сельскохозяйственных машин.

**Стали для сварных конструкций.** Масса сварных конструкций в сельскохозяйственном машиностроении составляет более 70 % в общей металлоемкости машин. Для сварных конструкций используются стали с невысоким содержанием углерода (до 0,35 %). Из углеродистых конструкционных сталей – это 10, 15кп, 20кп, 25, 30, 35, а сталей обыкновенного качества – это Ст 3, Ст 5пс, Ст 4, Ст 5. Однако свариваемость стали в значительной степени зависит от ее химического состава. Для упрощенной оценки свариваемости углеродистых сталей и сталей с небольшим содержанием марганца и кремния пользуются обычно следующей эмпирической зависимостью:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn}}{4} + \frac{\text{Si}}{4},$$

где  $C_{\text{экв}}$  – условный эквивалент углерода.

Стали, имеющие  $C_{\text{экв}} < 0,45$ , относятся к хорошо свариваемым. Сварными изготавливаются следующие ответственные узлы сельхозмашин: рамы, несущие брусья, резервуары, трубопроводы дождеваль-ных установок, молотильные и режущие барабаны, а также кожухи и различные ограждения, узлы для оборудования животноводческих ферм, погрузочные щиты трелевочных тракторов.

Сталь Ст 3 группы А любой степени раскисленности чаще других применяется для изготовления различных кожухов, ограждений желобов и других малоответственных и слабонагруженных узлов.

Области применения углеродистых качественных сталей приведены в табл. 4.

Таблица 4

Назначение углеродистых качественных сталей

Марка стали	Примерное назначение
08 10	Для штампуемых деталей, а также цементируемых и цианируемых деталей, не требующих высокой прочности сердцевины (втулки ушка рессоры, шайбы диафрагмы, коромысла клапанов крана автомобиля, зубчатые колеса, фрикционные диски и др.). Для деталей, которые должны обладать высокой пластичностью (трубки, прокладки, шайбы, вилки, тяги и др.)
15 20 15Г 20Г	Для цементируемых и цианируемых деталей, от которых требуется высокая твердость поверхности и невысокая прочность сердцевины (фрикционные диски, поршневые пальцы маломощных двигателей, пальцы рессор, неотвественные шестерни и червяки). Для термически необрабатываемых осей, втулок, вкладышей, трубок, штуцеров. Для сварных и штамповых деталей с невысокой прочностью (подмоторные рамы, башмаки, косынки и т. п.)
25	Для осей, муфт, валиков, рычагов, фланцев, шайб и других некрупных деталей. Применяется в нормализованном, термически обработанном цементуемом или цианированном состоянии
30 35	Для деталей, испытывающих небольшие напряжения (оси, валики, шпиндели, втулки, звездочки, тяги, траверсы, рычаги, цилиндры прессов, валы, крепежные детали, шлицевые валики и др.)

Продолжение табл. 4

Марка стали	Примерное назначение
25Г 30Г 35Г	Для рычагов сцепления, вилок переключения передач, тяг, рулевого управления, тормозных педалей, фланцев, кронштейнов, крепежных деталей в нормализованном состоянии
40 45	Для коленчатых валов, шатунов, зубчатых венцов маховиков, шестерен, распределительных валиков, болтов, гаек, шпонок, храповиков, бандажей, фрикционных дисков, плунжеров, шпинделей, осей, муфт, зубчатых реек, пальцев траков гусениц и для других нормализуемых, улучшаемых и подвергаемых поверхностной термообработке деталей, от которых требуется повышенная твердость поверхности
40Г 45Г	Для полуосей грузовых автомобилей, распределительных валиков, коленчатых валов, шатунов, передних осей, карданных валов, тормозных рычагов, дисков трения, шестерен непрерывного зацепления, шлицевых и шестеренных валов, крепежных деталей. Стали обладают большой прочностью и высокими упругими свойствами. Применяются в холоднотянутом виде, в нормализованном состоянии и после закалки и высокого отпуска (улучшение)
50Г	Для втулок подшипника кривошипа, зубчатого обода колеса, обода маховика, рессор, дисков трения, шлицевых и шестеренных валов. Применяются после термообработки (закалка и отпуск, иногда в нормализованном состоянии)
50 55	Для шестерен, прокатных валков, штоков, валов, осей, бандажей, эксцентриков, малонагруженных пружин и рессор, отвалов и др. Применяется после закалки и соответствующего отпуска и в нормализованном состоянии

Окончание табл. 4

Марка стали	Примерное назначение
60	Для прокатных валков, эксцентриков, осей, шпинделей, бандажей, пружинных колец, пружин амортизаторов, пружин сцепления, замочных шайб, дисков сцепления. Применяется после закалки и соответствующего отпуска, а также после нормализации (для крупных деталей). Обладает высокими прочностными и упругими свойствами
65 70 75 85	Для изготовления пружин различных механизмов и машин: рессор, пружин клапанов двигателей автомобиля, плоских пружин прямоугольного сечения толщиной от 3 до 12 мм (сталь 65Г), пружин из проволоки диаметром 0,14–8 мм с холодной навивкой пружин различных размеров после закалки с последующим средним отпуском при 300 °С
60Г 65Г	Для изготовления плоских и крупных пружин, рессор, пружинных колец, шайб гровера и других деталей пружинного типа, от которых требуются высокие упругие свойства и повышенное сопротивление износу, рабочие органы почвообрабатывающих машин, сегменты режущего аппарата косилок после закалки и среднего отпуска

### Инструментальные углеродистые стали

Инструментальными сталями называют углеродистые стали, обладающие высокой твердостью ( $HRC$  60–64), прочностью и износостойкостью и применяемые для изготовления различного инструмента. Обычно это стали, структура которых после закалки и низкого отпуска – мартенсит – избыточные карбиды.

Инструментальные углеродистые стали не теплостойки и обладают небольшой прокаливаемостью.

Углеродистые инструментальные стали маркируют буквой *У* (углеродистая), следующая за ней цифра (*У7*, *У8*, *У10* и т. д.) показывает среднее содержание углерода в десятых долях процента. Буква *А* в конце (*У10А*) указывает, что сталь высококачественная.

ГОСТ 1435-74 предусматривает восемь марок качественной и восемь марок высококачественной углеродистой инструментальной стали. Высококачественные углеродистые стали содержат меньше серы и фосфора и менее склонны к образованию трещин при закалке и шлифовании.

Углеродистые инструментальные стали применяются для изготовления инструментов, для которых требуется сквозная закалка толщиной или диаметром не более 10–12 мм, а также для более крупных инструментов (толщиной 15–30 мм), у которых режущая часть приходится на поверхностный слой (напильники, зенкеры и др.). Назначение и общая характеристика углеродистых инструментальных сталей приведены в табл. 5.

Таблица 5

Назначение и общая характеристика углеродистых инструментальных сталей

Марки стали	Примерное назначение
У7 У7А	Для инструмента, подвергающегося ударам: зубила, штампы, кузнечные и слесарные молотки, плотницкий инструмент (стамески, долота)
У8 У8Г У8А У8ГА	Для инструмента, подвергающегося ударам: штампы, матрицы, пуансоны, пробойники, слесарный инструмент, пилы, зубила
У9 У9А	Для инструмента, требующего твердости и некоторой вязкости: кернеры, столярный инструмент, зубила по камню
У10 У10А У11 У11А	Для изготовления режущего и мерительного инструмента: резцы, калибры, плитки. Вытяжные, обрезные и вырубные штампы небольших размеров и простой формы
У12 У12А	Режущий и мерительный инструмент, хирургический инструмент
У13 У13А	Резцы по твердому металлу, бритвы, граверный инструмент, шаберы, напильники

Твердость является одной из основных характеристик инструментальных сталей. Твердость углеродистых инструментальных сталей после термообработки представлена в табл. 6.

Таблица 6

Твердость углеродистых инструментальных сталей  
после термообработки

Марки сталей	Режим закалки		Твердость после закалки, HRC	Твердость HRC после отпуска при температуре в °C		
	Температура, °C	Охлаждающая среда		200	300	400
У7А	790–810	Сначала в воде до температуры 200–250 °C, а затем в масле до полного охлаждения	62–64	60–62	52–56	48–52
У8А	780–800		63–65	61–63	52–56	48–52
У9А	770–790		63–65	61–63	52–56	48–52
У10А	770–790		62–64	61–63	54–58	48–52
У11А	770–790		62–64	61–63	54–58	48–52
У12А	770–790		62–64	61–63	54–58	48–52
У13А	770–790		62–64	61–63	54–58	48–52

### Маркировка легированных сталей

Марка легированных сталей состоит из сочетания букв и цифр, обозначающих ее химический состав. По ГОСТ 4543-71 принято обозначать хром – Х, никель – Н, марганец – Г, кремний – С, молибден – М, вольфрам – В, титан – Т, ванадий – Ф, алюминий – Ю, медь – Д, ниобий – Б, бор – Р, кобальт – К. Цифра, стоящая после буквы, указывает на примерное содержание легирующего элемента в процентах. Если цифра отсутствует, то легирующего элемента меньше или около 1 %.

Две цифры в начале марки конструкционной легированной стали показывают содержание углерода в сотых долях процента. Например, сталь 20ХН3А в среднем содержит 0,20 % углерода, ~1 % хрома и 3 % никеля. Буква А в конце марки означает, что сталь высококачественная. Особовысококачественные стали имеют в конце марки букву Ш, например 30ХГСШ.

Такой же принцип маркировки характерен для инструментальных сталей. Однако в начале марки стоит одна цифра, показывающая содержание углерода в десятых долях процента. При содержании в них 1 % С или более начальную цифру опускают. Например, в стали ХВ4 содержится более 1 % углерода, ~1 % хрома и 4 % вольфрама.

Некоторые группы узкоспециализированных сталей содержат дополнительные обозначения: марки шарикоподшипниковых сталей начинаются с буквы Ш, электротехнических – с буквы Э, автоматных – с буквы А.

Иногда в конце некоторых марок стали индексами указывается вид дополнительной улучшающей металлургической обработки: ЭШП – электрошлаковый переплав, ЭЛП – электронно-лучевой переплав и пр.

Стали экспериментальных марок, не включенные в ГОСТ, обозначаются буквами с номером, присваиваемым разработчиком. Например, стали, выплавляемые заводом «Электросталь», маркируют сочетанием букв ЭИ (электросталь исследовательская) или ЭП (электросталь пробная) и порядковым номером (например, ЭИ415, ЭП716 и т. д.). После промышленного освоения условные обозначения заменяют на марку, отражающую примерный состав стали.

Улучшение механических свойств обусловлено влиянием легирующих элементов на свойства феррита, дисперсность карбидной фазы, устойчивость мартенсита при отпуске, прокаливаемость, размер зерна.

При взаимодействии легирующих элементов с железом и углеродом могут образовываться механические смеси, твердые растворы, химические и интерметаллические соединения. Сталь несколько упрочняется при образовании твердых растворов и значительно при образовании химических и интерметаллических соединений.

Легирующие элементы, растворяясь в феррите, повышают его твердость, прочность, снижают пластичность. Такими элементами являются кремний, марганец, хром, никель, кобальт, вольфрам, молибден и др. Никель сильно упрочняет феррит, не снижая его вязкости.

К основным элементам-карбидообразователям, образующим химические соединения типа MeC, относятся железо, марганец, хром, вольфрам, молибден, ванадий, титан, тантал, ниобий, цирконий. Они придают сталям высокую твердость, прочность и износостойкость.

Склонность к перегреву сталей увеличивают бор и марганец, уменьшают – алюминий, ванадий, вольфрам, хром, титан и др.

Прокаливаемость сталей увеличивают бор, вольфрам, кремний, марганец, никель, хром, уменьшают – алюминий, кобальт, титан.

Жаропрочность сталей повышают хром, бор, ванадий, вольфрам, кобальт, марганец, молибден, никель, ниобий, титан.

Коррозионную стойкость сталей улучшают хром, кобальт, кремний, молибден, никель, хром, титан, ниобий, ухудшает – бор.

## Конструкционные легированные стали

В зависимости от наличия легирующих элементов бывают хромистые, марганцовистые, хромомарганцовистые, хромокремнистые, хромоникелевые и другие легированные стали; по степени легирования – низко- (до 3 %), средне- (3–10 %) и высоколегированные (свыше 10 % легирующих элементов). Если в сталях содержание железа менее 50 % и содержание легирующих элементов больше, чем железа, то такие стали называют сплавами.

Примеры марок некоторых конструкционных легированных сталей: 10Г2, 40Г2, 50Г2, 55С2, 60С2, 70С2, 15Х, 38ХА, 45Х, 30ХС, 20ХНЗА, 30ХН2МА, 30ХРА, 30ХМА, 20ХГСА, 14Х2НЗМА, 18ХГТШ, 20ХГНТР, 45ХН2МФА, 18Г2АФД, 38Х2МЮА.

Из конструкционных сталей, легированных одним компонентом, наиболее широко в сельскохозяйственном машиностроении применяются марганцевые, кремнистые и хромистые стали.

**Марганцевые стали.** К этим сталям по ГОСТ 14959-79 входят качественные углеродистые стали группы II с повышенным содержанием Mn. Для изготовления деталей сельхозмашин применяются конструкционные стали с 1 или 2% Mn: 15Г, 20Г, 25Г, 30Г, 50Г2, 65Г, 70Г. Изделия из сталей 30Г и с большим содержанием углерода (50Г, 65Г, 70Г) подвергаются закалке и отпуску, а стали 15Г, 20Г, 25Г предварительно проходят еще и цементацию.

Марганец в таких сталях находится в твердом растворе. Он повышает прочность и твердость, но особенно заметно увеличивает упругие свойства стали (табл. 7).

Таблица 7

Механические свойства сталей 40, 40Г

Сталь	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	НВ	$\delta$ , %	КС, кДж/м <sup>2</sup>
40	540	300	190	17	400
40Г	640	320	225	28	1800

Примечание. Указанные металлические свойства приведены для отожженного состояния сталей;  $\sigma_T$  – предел текучести, КС – ударная вязкость.

Марганец значительно повышает устойчивость аустенита, снижает температуру мартенситного превращения и критическую скорость заковки, тем самым увеличивая прокаливаемость стали. При содержании Mn > 1,5 % у стали появляется склонность к необратимой отпускной хрупкости, поэтому для таких сталей необходимо избегать температур отпуска более 500 °С или проводить его с высокой скоростью охлаждения.

Из марганцевых сталей изготавливают:

– кольца, рессоры, оси, втулки, болты, толкатели, валы-шестерни (сталь 20Г) с цементацией при 920–950 °С на глубину 1,6 мм с последующей закалкой с 810–830 °С в масле и отпуском при 180–200 °С на твердость HRC 56–63;

– звенья крючковой приводной цепи (сталь 30Г) с закалкой от 850–870 °С в воде и отпуском при 300–400 °С на твердость HRC 38–45;

– втулки, фланцы, стаканы, рычаги, дисковые звездочки (сталь 50Г) с закалкой в воде от 840–850 °С и отпуском при 450–600 °С на твердость HRC 25–40;

– рессоры (сталь 50Г2) с закалкой в масле от 810–830 °С и отпуском при 450–500 °С на твердость HRC 38–42;

– пружины, рессоры; кольца стопорные (сталь 65Г) с закалкой в масле от 780–810 °С и отпуском при 320–380 °С на твердость HRC 40–50; лапы культиватора с закалкой ТВЧ рабочих кромок на твердость HRC 55–62;

– сегменты режущего аппарата жатки (сталь 70Г, а так же сталь У9А).

Марганцевые стали часто используются для сварных конструкций. На изготовление ответственных сварных конструкций (несущие брусья, подъемные стрелы и т. п.) идут низкоуглеродистые марганцевые стали 09Г2, 10Г2, 15Г, обладающие хорошей свариваемостью ( $C_{эжв} < 0,45$ ). Стали марок 20Г, 25Г относятся к удовлетворительно свариваемым и применяются для малоответственных и слабонагруженных узлов.

**Кремнистые стали.** В сельскохозяйственном машиностроении получили распространение кремнистые стали 55С2, 60С2 и 70С2, содержащие 1,5–2,0 % Si. В таких концентрациях кремний образует твердый раствор с железом, уменьшает критическую скорость заковки и повышает прокаливаемость стали. Кремний повышает прочность, твердость, упругость и снижает пластичность стали (табл. 8).

Таблица 8

Механические свойства сталей 60, 60С2

Сталь	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	<i>HV</i>	$\delta$ , %	$\psi$ , %
60	930	780	280	12	10
60С2	1300	1200	400	20	6

*Примечание.* Указанные свойства приведены после отжига,  $\psi$  – относительное сужение.

В промышленности эти стали имеют строгое функциональное назначение: из них изготавливают пружины, рессоры, шайбы, натяжные пружины и другие упругие детали. Основные требования к таким деталям – высокий предел упругости  $\sigma_y$  и усталости. Этим требованиям удовлетворяют стали, легированные такими элементами, которые повышают предел упругости, приближая отношение  $\sigma_y/\sigma_B$  к единице. Таким элементом является, прежде всего, Si, кроме него – Mn, Cr, V, W.

Изделия из указанных сталей проходят закалку в масле от 870–890 °С и средний отпуск при 400–500 °С. Получающаяся при этом трооститная структура с твердостью *HRC* 40–45 отличается мартенситоподобной игольчатостью и дает  $\sigma_y/\sigma_B \approx 0,8$ . Наблюдаемое при этом некоторое снижение ударной вязкости не влияет на качество работы пружины. Отличительная черта кремнистых сталей – устойчивость против отпуска. Этим они выделяются в группе пружинно-рессорных сталей 65, 70, 65Г, 60С2А, 50ХФА, 60С2Н2А и др.

**Хромистые стали.** Конструкционные хромистые стали, применяемые в сельхозмашиностроении, содержат не более 2 % Cr. В таких концентрациях хром обычно входит в  $\alpha$ -твердый раствор Fe, увеличивая его прочностные свойства (табл. 9).

Таблица 9

Механические свойства сталей 40, 40Х

Сталь	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	<i>HV</i>	$\delta$ , %	$K_{IC}$ , кДж/м <sup>2</sup>
40	540	300	190	17	400
40Х	700	480	240	15	500

*Примечание.* Свойства указаны для отожженного состояния стали.

Хром значительно повышает прокаливаемость стали, способствует более равномерному распределению твердости по сечению. Хромистые стали обладают значительно большей устойчивостью переохлажденного аустенита, чем углеродистые, особенно при температуре 450–600 °С. Кроме того, в этих сталях возможно получение бейнитной структуры даже при охлаждении на воздухе, не говоря уже об охлаждении в масле и воде. Поэтому хромистые стали охотно используются для ответственных в отношении прочности деталей, которым необходима прочность по всему сечению, в частности, для деталей, работающих на износ при повышенных нагрузках. Помимо всего прочего, детали с бейнитной структурой почти не деформируются при закалке.

Недостатком хромистых сталей является склонность их к отпускной хрупкости, которая, впрочем, является обратимой (II рода) и устраняется ускоренным охлаждением детали после отпуска (в воде или масле), в отличие от отпускной хрупкости I рода (необратимой).

Хромистые стали нашли в сельхозмашиностроении следующее применение:

– цементуемые стали 15Х, 20Х проходят цементацию при 920–950 °С на глубину 0,8–1,2 мм, а затем закалку от 780–820 °С в масле и низкий отпуск, из них изготавливают тяговые втулочно-роликовые цепи, крестовины карданных соединений (20Х), валы, шестерни, оси, толкатели, пальцы, шпиндели, червяки;

– улучшаемые 38ХА, 40Х, 45Х подвергаются закалке от 820–860 °С в воде и отпуску при различных температурах на необходимую твердость. Их используют для изготовления пластин крупных тяговых втулочно-роликовых цепей, главных приводных валов жаток (40Х); пальцев роликов (45Х); звездочек с закалкой венца ТВЧ до *HRC* 40–50 на глубину 2–3 мм (40Х); деталей крепежа, осей, шпинделей, штоков, кулачков, втулки (38ХА, *HRC* 35–45); валов шестерней, осей, полуосей, ступиц (38ХА, *HRC* 25–30); дисков сцепления, шатунов, вилок, рычагов, шестерней (40Х).

### Многокомпонентные конструкционные стали

Введением в сталь нескольких легирующих элементов можно в широких пределах варьировать механические свойства, добиваясь, в частности, сочетания высоких прочностных, пластических и упругих свойств. Все легирующие элементы, кроме никеля, повышают прочность, но снижают в большинстве случаев пластичность и

вязкость стали. Никель вводится в сталь главным образом для сохранения высокой ударной вязкости. Поэтому никельсодержащие стали применяют для работы в сложнапряженных условиях.

В сельскохозяйственном машиностроении используют цементуемые стали 12ХН3М, 30Х2Н4А для изготовления шестерен, валов, червяков. Цементацию проводят при температуре 930–950 °С, закалку – при 830–850 °С (в масле), отпуск – при 180–200 °С на твердость не ниже *HRC* 58. Однако хромоникелевые стали еще больше чувствительны к отпускной хрупкости II рода, чем хромистые стали. Поэтому после отпуска их охлаждают в воде или масле. Но в крупных деталях и эта мера может быть недостаточной из-за низкой скорости охлаждения сердцевин. В этом случае необходимо дополнительное введение молибдена или вольфрама, которое резко увеличивает прокаливаемость стали не только цементуемой, но и улучшаемой. Поэтому стали, например, 18ХНВА и 40ХНМА закалывают на воздухе и изготавливают из них крупногабаритные детали, работающие в условиях динамических нагрузок.

Хромоникелевые цементуемые стали 20ХН, 12ХН3А, 12ХН2, аналогично сталям 15Х, 20Х, имеют в сердцевине бейнитную структуру с высокой прочностью (при небольшом сечении изделия) и применяются для деталей, работающих на износ при повышенных нагрузках (втулки, валики, оси, шестерни, кулачковые муфты и др.). Однако все стали, содержащие никель, склонны к образованию карбидной сетки, плохо обрабатываются и имеют в структуре остаточный аустенит. Поэтому часто никель заменяют марганцем с добавками титана (0,05–0,12 %). Титан способствует получению мелкозернистого строения и делает сталь технологичной. Из таких сталей достаточно широко распространены 18ХГТ, 20ХГР, 30ХГТ.

Механические свойства всех указанных типов цементованных сталей (12ХН3А, 18НВА, 18ХГТ) близки по своим значениям:  $\sigma_b \approx 1000$  МПа;  $\sigma_t \approx 800$  МПа;  $\psi \approx 50\%$ ;  $\delta \approx 10\%$ ;  $KC \approx 850$  кДж/м<sup>2</sup>. Поэтому при изготовлении сложных деталей с технологической точки зрения предпочтение отдается стали 18ХГТ перед сталью 12ХН3А, например, для крестовин карданных соединений (цементация на глубину 0,8–1,4 мм с закалкой и отпуском на твердость *HRC* 58–65).

Цементуемые безникелевые стали 18ХГТ, 20ХГР, 30ХГТ подвергают газовой цементации или нитроцементации при температуре 950 °С на глубину 0,7–1,4 мм с объемной или индукционной закалкой от 840–850 °С и отпуском при температуре 180–200 °С. Так, например, вал-шестерня из стали 25ХГТ зерноуборочного

комбайна после такого комплекса операций имеет твердость поверхности зуба *HRC* 57–64, а сердцевин – *HRC* 36–46.

Для цементуемых сталей, содержащих 3–4 % Ni, чтобы снизить количество остаточного аустенита, в зависимости от технологического процесса проводят или высокий отпуск после химико-термической обработки, или обработку холодом после закалки.

Низколегированные цементуемые стали часто применяют для изготовления ответственных и тяжелонагруженных сварных конструкций и узлов:

– 10Г2Б, 12Г2Б, 16Г2Б, 09Г2С, 09Г2ДТ, 12ГС – для сварных конструкций почвообрабатывающих машин (рамы плугов) взамен сталей Ст 3 и Ст 5;

– 17ХГ2САФР, 18Г2АФпс – рамы, платформы, прицепы, тяги, стойки, испытывающие высокие напряжения при циклическом и динамическом нагружении, особенно при пониженных температурах.

Все рассмотренные выше цементуемые стали в состоянии эксплуатации изделия имеют твердость сердцевин в пределах *HRC* 35–45.

Из улучшаемых многокомпонентных конструкционных сталей в сельхозмашиностроении используются 40ХН, 45ХН (пальцы, оси, проводки), 30ХН3А (втулки, фланцы, стаканы), 40ХНМА (крупногабаритные детали, работающие с динамическими нагрузками), 50ХФА и 60С2Н2А (тяжело нагруженные рессоры и пружины тракторов и комбайнов). Такие стали подвергают закалке при температуре от 830–870 °С в масле или на воздухе (40ХНМА) и отпускают при различных температурах в зависимости от назначения изделия и необходимой твердости.

К рассматриваемой группе можно было бы отнести и широко распространенные стали 35ХМФА, 38ХМЮА, 18Х2Н4ВА и т. п., обладающие высокой механической прочностью и подвергающиеся азотированию для повышения износостойкости и усталостной прочности. Но такие стали применяются, главным образом, для двигателей тракторов и сельхозмашин и, поэтому подлежат рассмотрению в специальной литературе по тракторо- и двигателестроению.

### **Стали и сплавы с особыми свойствами (ГОСТ 5949-75)**

**Износостойкие стали и сплавы.** Износ деталей машин заключается в изменении формы и массы сочлененных движущихся тел под действием сил трения. Он зависит от условий взаимодействия

трущихся пар и определяется влиянием многих факторов. Однако характер и интенсивность разрушения металла определяются, как правило, доминирующим видом износа.

По характеру взаимодействия трущихся тел в сельскохозяйственных машинах можно выделить шесть видов трения:

– скольжение со смазкой, когда механизм износа заключается в истирании оксидных пленок и деформации, который наблюдается в подшипниковых парах (антифрикционный сплав-сталь);

– качение со смазкой: контактные и коррозионно-механические повреждения в шариковых и роликовых подшипниках (сталь по стали);

– полусухое трение: истирание оксидных пленок, передеформирование неровностей в сочленениях механизмов сельскохозяйственных машин (сталь по чугуну, сталь по стали);

– скольжение с абразивной прослойкой: передеформирование и единичное микрорезание в пальцах и траках гусениц (сталь по стали);

– скольжение в абразивной среде (почве): передеформирование, истирание оксидных пленок и выкрашивание при работе плугов и культиваторов (сталь или твердый сплав по почве);

– резание органической массы: абразивный износ, истирание оксидных пленок, выкрашивание (сегменты косилок, режущие пары стригальных машинок).

При любом виде трения механизм износа определяется свойствами материалов трущихся пар и условиями взаимодействия. Поэтому, зная механизм износа, можно делать необходимые выводы о методах упрочнения материала, повышающих его износостойкость. Так, при передеформировании (смятии) поверхностных слоев металла необходимо повышать предел прочности и твердость: при выкрошивании – динамическую прочность, сопротивление контактной усталости, при истирании окисных пленок – коррозионную стойкость сплава.

**Графитизированная сталь.** Графитизированная сталь представляет собой заэвтектоидную сталь (1,2–1,7 % С) с повышенным содержанием кремния (0,7–1,4 %) и возможными небольшими добавками легирующих элементов. В литом и горячедеформированном состоянии ее структура ничем не отличается от углеродистых заэвтектоидных сталей (пластинчатый перлит и карбиды, *HВ* 350). После двух стадий графитизации (подобно ковкому чугуну) часть углерода из цементита переходит в структурно свободное состояние в виде округлых или вытянутых включений графита.

Графитизированная сталь со структурой феррит и графит (*HВ* 100–110) имеет низкий коэффициент трения. Такая сталь с высокими антифрикционными свойствами применяется для втулок подшипников скольжения, сепараторов подшипников качения, поршней, стаканов тормозных колодок и т. п.

Графитизированная сталь по своим литейным свойствам близка к чугуну. В то же время она легко куется и прокатывается (при содержании графита до 0,5 %), хорошо обрабатывается резанием, поскольку на поверхности трения находится свободный графит. Закаленная графитизированная сталь не склонна к схватыванию или налипанию. Она отличается хорошей износостойкостью и способностью к поглощению вибраций.

Цикл термической обработки, формирующий в этой стали наилучший комплекс механических свойств и износостойкости, состоит из графитизирующего отжига на зернистый перлит, закалка с температурой 800–860 °С в масле или воде и отпуск при температуре 150–180 °С на твердость *HRC* 55.

В графитизированную сталь вводятся легирующие элементы: W и Mo способствуют измельчению зерна; Si, Al, Cu, Ni ускоряют графитизацию; Cr и W повышают износостойкость; все эти элементы, кроме Al, повышают ее прокаливаемость.

Из графитизированной стали 125С2РЛ изготавливают литые пальцы режущего аппарата жатки. Применяются также графитизированные стали в кованом состоянии (ЭИ293, ЭИ336, ЭИ366).

**Сталь Гадфильда.** Высокомарганцовистая литейная сталь Г13Л или 110Г13Л (в кованом состоянии – ЭИ256) относится к аустенитному классу. В литом состоянии эта сталь имеет карбиды по границам аустенитных зерен, что является причиной высокой хрупкости. Для растворения карбидов и придания однородности аустениту сталь закалывают в воде от 1050–1100 °С. Твердость после закалки *HВ* 170–220. Однако эта твердость не определяет износостойкость стали Гадфильда. Однородный аустенит чрезвычайно склонен к наклепу, поэтому эта сталь в условиях высоких динамических (ударных) нагрузок и высоких контактных давлений накаливается, значительно увеличивая свою износостойкость по сравнению с обычными сталями той же твердости. Твердость поверхностного слоя может возрасти до *HВ* 550–580. Хотя при небольших контактных давлениях в условиях абразивного износа и трения сталь Гадфильда не имеет преимуществ перед другими сталями.

Из этой стали изготавливают звенья гусеничных цепей (траки) сельскохозяйственных машин и тракторов, щеки, конуса, билы, бронештановочные плиты различных дробилок и мельниц, зубья ковшей экскаваторов и т. п.

**Шарикоподшипниковые стали.** Как и в любой машиностроительной отрасли, при производстве сельхозтехники без шарикоподшипников не обойтись. Для их производства используются высокоуглеродистые хромистые стали ШХ15 и ШХ15СГ заэвтектоидного типа. Эти стали при высокой твердости, прочности и износостойкости отличаются высоким сопротивлением деформации и особенно контактной усталости. Термообработка заключается в закалке при температуре от 820–840 °С в масле и отпуске при 150–160 °С на твердость *HRC* 58–62. Рабочие поверхности подвергают тонкому шлифованию, а затем полированию и доводке, так как микронеровности при трении служат очагами усталостного шелушения металла.

**Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали.** Коррозией называют поверхностное разрушение металла под воздействием внешней среды. Для того чтобы обладать антикоррозионными свойствами, сталь должна содержать не менее 12 % хрома. В этом случае сталь приобретает положительный электрохимический потенциал. Она не ржавеет, не окисляется на воздухе, в воде, в ряде кислот, солей и щелочей.

Кроме хрома, в состав коррозионно-стойких сталей (до 0,4 % С) могут входить никель (8–15 %; сталь аустенитного класса), титан (до 0,8 % для измельчения зерна). В зависимости от степени содержания легирующих элементов сталь будет относиться к разным структурным классам и, соответственно, иметь разные свойства и области применения.

Нельзя сказать, что при изготовлении сельхозтехники коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали применяются широко. Условия эксплуатации сельхозмашин позволяют использовать в качестве защиты от коррозии разнообразные виды недорогих покрытий, поэтому в этой отрасли машиностроения встречается сталь Х13 для деталей, подвергающихся действию слабоагрессивных сред и ударных нагрузок (предметы домашнего обихода), и сталь Х17 для деталей, работающих в агрессивных средах (трубопроводы и емкости для удобрений, кислот).

Стали 12Х13 и 20Х13 применяются после закалки и низкого отпуска для изготовления деталей с повышенной пластичностью,

подвергаемых при работе ударным нагрузкам, работающих в слабоагрессивных средах при комнатной температуре.

Стали 30Х13, 40Х13 применяются после закалки и низкого отпуска с обязательной полировкой или шлифовкой для изготовления режущего, мерительного и хирургического инструмента, пружин, карбюраторных игл и т. д. Отличаются повышенной твердостью.

Сталь применяется для изготовления тяжелонагруженных деталей, работающих на истирание и удар в агрессивных средах.

**Жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы.** Жаростойкие (окалиностойкие) стали и сплавы обладают стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах выше 550 °С и работают в ненагруженном или слабонагруженном состоянии. Назначение и общая характеристика некоторых марок жаростойких сталей и сплавов приведена в табл. 10.

Таблица 10

Назначение и общая характеристика марок жаростойких сталей и сплавов

Марки стали	Рекомендуемая максимальная температура применения в течение длительного времени (до 1000 ч), °С	Назначение
15Х5	600–650	Трубы
40Х9С2 40Х10С2М 30Х13Н7С2		Клапаны выпуска автомобильных, тракторных и дизельных двигателей, трубы рекуператоров, теплообменники, колосники
15Х6С10	–	Трубы, детали котельных установок
15Х25Т 15Х2В	950	Аппаратура, детали, чехлы термопар, электроды искровых зажигательных свечей, трубы пиролизных установок, теплообменники
08Х20Н14С2	–	Трубы
20Х20Н14С2 36Х18Н25С2	1000	Печные конвейеры, ящики для цементации

Жаропрочность – это способность стали или сплава противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах (не изменять характеристики прочности) длительное время. Назначение и общая характеристика некоторых марок жаропрочных сталей и сплавов приведена в табл. 11.

Таблица 11

Назначение и общая характеристика некоторых марок жаропрочных сталей и сплавов

Марки стали	Температура работы, °С	Температура начала интенсивного окисления, °С	Назначение
40X9C2 40X10C2M 45X14H14B2M	650	850	Клапаны авто-тракторных двигателей, крепежные детали
12X18H10T 12X18H12T	600	850	Детали выхлопных систем. Трубы
12X25H16Г7А ХР38ВТ ХР60Ю ХН75МБТЮ ХН70Ю	950 1100 950 1100	1050–1100 1200 1050 1200	Листовые детали, газопроводы, работающие при умеренных напряжениях
20X23H18	1000	1050	Детали установок в химической и нефтяной промышленности, газопроводы, камеры сгорания (может применяться для нагревательных элементов сопротивления)

К сплавам с особыми физическими свойствами относятся сплавы высокого электросопротивления (реостатные медно-никелевые сплавы – манганин и константан; фехраль Х1304 и нихром Х20Н80 для электронагревателей), сплавы с постоянным коэффициентом линейного расширения (инвар Н36), сплавы с постоянным модулем

упругости (элинвар ЭИ25), магнито-жесткие сплавы для постоянных магнитов (ЕХ, ЕХ5К5, алнико, магнико), магнито-мягкие сплавы для сердечников реле и трансформаторов (техническое железо, электротехническая сталь Э1, Э2, трансформаторное железо Э3, Э4) и немагнитные сплавы (аустенитные стали Г13Л, Х18Н12 и др.).

Эти сплавы с заданными физическими свойствами используются для изготовления электротехнического оборудования и приборов, применяемых на тракторах и сельскохозяйственных машинах.

### Инструментальные легированные стали

Инструментальные легированные стали, как и углеродистые, обладают высокой твердостью ( $HRC$  60–64), прочностью и износостойкостью и применяются для изготовления различного инструмента. Обычно это заэвтектоидные или ледебуритные стали, структура которых после закалки и низкого отпуска – мартенсит-избыточные карбиды.

Одной из главных характеристик инструментальных сталей является теплостойкость (или красностойкость), т. е. устойчивость против отпуска при нагреве инструмента в процессе работы.

Все инструментальные стали подразделяют на три группы: не обладающие теплостойкостью (углеродистые и легированные стали, содержащие до 3–4 % легирующих элементов), полутеплостойкие (содержащие свыше 0,6–0,7 % С и 4–18% Cr) и теплостойкие (высоколегированные стали, содержащие Cr, W, V, Mo, Co, ледебуритного класса) получившие название быстрорежущих.

Другой важной характеристикой инструментальных сталей является прокаливаемость. Высоколегированные теплостойкие и полутеплостойкие стали обладают высокой прокаливаемостью.

Для инструмента, требующего повышенной вязкости, например, для штампов горячего деформирования, применяют доэвтектоидные стали, которые после закалки на мартенсит подвергают отпуску при более высокой температуре для получения структуры троостита и даже сорбита. Износостойкость и твердость этих сталей ниже, чем заэвтектоидных.

Легированные инструментальные стали X, 9X, 9XC, 6XBG и т. д. маркируют цифрой, показывающей среднее содержание углерода в десятых долях процента, если его содержание < 1 %. Если содержание углерода ~ 1 %, то цифра чаще отсутствует. Буквы означают

легирующие элементы, а следующие за ними цифры – содержание (в целых процентах) соответствующего легирующего элемента.

Быстрорежущие стали маркируют буквой Р. Следующая за ней цифра указывает среднее содержание главного легирующего элемента быстрорежущей стали – вольфрама (в процентах). Среднее содержание ванадия в стали обозначают цифрой, проставляемой за буквой Ф, кобальта – цифрой за буквой К и т. д. Среднее содержание хрома в большинстве быстрорежущих сталей составляет 4 % и поэтому в обозначении марки стали не указывается.

Стандарт устанавливает две группы инструментальных легированных сталей:

1. Стали для режущего и мерительного инструмента:

1) неглубокой прокаливаемости – 7ХФ; 9ХФ; 11ХФ; 13Х; ХВ и др.;  
2) глубокой прокаливаемости – Х; 9ХС; ХВГ; 9Х5Ф; 9Х5ВФ.

2. Стали для штампового инструмента:

1) для деформирования в холодном состоянии – 9Х; Х6ВФ; Х12; Х12М; Х12Ф1; Х12ВМ и др.;

2) для деформирования в горячем состоянии – 4Х8В2; 7Х3; 8Х3; 5ХНМ и др.;

3) для ударного инструмента – 4ХС; 6ХС; 5ХВ2С; 6ХВ2С; 6ХВНГ и др.

В табл. 12 приведены области применения наиболее часто используемых инструментальных легированных сталей.

Таблица 12

Назначение и общая характеристика легированных сталей после термообработки

Марки стали	Назначение
7ХФ	Для рамных, круглых и ленточных пил с плющенными и разведенными зубьями, для деревообрабатывающих инструментов (топоры, долота), а также для инструментов, работающих с ударными нагрузками (зубила, пуансоны)
9ХФ	Для ременных, ленточных, круглых пил, для ножей при холодной резке металла, для обрезных матриц и пуансонов при холодной обрезке заусенцев, для кернов
11ХФ	Для метчиков и другого режущего инструмента диаметром до 30 мм, закаливаемого с охлаждением в горячих средах

Марки стали	Назначение
13Х	Для бритвенных ножей и лезвий, острого хирургического инструмента, шаберов, гравировального инструмента
ХВ	Для резцов и фрез при обработке с небольшой скоростью резания твердых материалов, для гравировальных резцов при очень напряженной работе
Х	Для зубил, применяемых при насечке напильников, для очень твердых кулачков эксцентриков и пальцев, для гладких цилиндрических калибров и калиберных колец штемпелей, для токарных, строгальных и долбежных резцов в лекальных и ремонтных мастерских
9ХС	Для сверл, резверток, метчиков, плашек, гребенок, фрез, машинных штемпелей, клейм для холодных работ
ХВГ	Для измерительных и режущих инструментов, для которых повышенное коробление при закалке особенно недопустимо, для резьбовых калибров, протяжек, длинных метчиков, длинных разверток, плашек и других видов специального инструмента
9Х5Ф 9Х5ВФ	Для ножей, применяемых для фрезерования древесины, строгальных пил и других деревообрабатывающих инструментов подобного типа
9Х	Для валов холодной прокатки, пробойников холодновысадочных матриц и пуансонов, для деревообрабатывающего инструмента
Х6ВФ	Для резьбонакатного инструмента (роликов и плашек), деревообрабатывающих инструментов, ручных ножовочных полотен, бритв, матриц, пуансонов, накатников и других инструментов, предназначенных для холодной деформации
Х12	Для холодных штампов высокой устойчивости против истирания (преимущественно с рабочей частью округлой формы), не подвергающихся сильным ударам и толчкам, для волочильных досок и волок, глазков для калибрования пруткового металла под накатку резьбы, гибочных и формовочных штампов, сложных секций кузовных штампов, которые при закалке не должны подвергаться значительным объемным изменениям и короблению, для матриц и пуансонов вырубных и просечных штампов, для штамповки активной жести электрических машин и электромагнитных систем электрических аппаратов

Окончание табл. 12

Марки стали	Назначение
X12M X12Ф1 X12BM	То же, что для стали марок X12, но когда требуется большая вязкость, – для профиловочных роликов сложных форм, сложных дыропрошивочных матриц при формовке листового металла, эталонных шестерен, накатных плашек, волок, для матриц и пуансонов вырубных и просечных штампов (в том числе совмещенных и последовательных) со сложной конфигурацией рабочих частей
4X8B2	Для матриц и пуансонов, работающих в тяжелых условиях нагрева, для пресс-форм, применяемых при формовке изделий из пластмасс, для пресс-форм цветного литья под давлением
7X38X3	Для матриц при горячей высадке металлических машинных частей и болтов на прессах и горизонтально-ковочных машинах со сменными рабочими вставками, для формовочных и прошивных пуансонов при горячей гибке и обрезке, для холодных штампов

Значение твердости наиболее часто применяемых инструментальных легированных сталей после термообработки приведены в табл. 13.

Таблица 13

Значение твердости наиболее часто применяемых инструментальных легированных сталей после термообработки

Марки стали	Температура закалки		Твердость по Роквеллу после закалки и низкого отпуска, <i>HRC</i>
	°C	охлаждающая среда	
7XФ	820–840	Масло	58
	800–830	Вода	58
9XФ	850–830	Масло	60
	820–840	Вода	60
11X	810–830	Масло	62
13X	780–810	Вода	64
XB4	800–820	Вода	65
X	840–860	Масло	62
9XC	840–860	Масло	62
XBГ	830–850	Масло	62

Окончание табл. 13

Марки стали	Температура закалки		Твердость по Роквеллу после закалки и низкого отпуска, <i>HRC</i>
	°C	охлаждающая среда	
9X5Ф	950–1000	Масло	59
9X5BФ	950–1000	Масло	59
9X	820–850	Масло	62
X6BФ	980–1000	Масло	61
X12	950–1000	Масло	58
X12M	950–1000	Масло	58
X12Ф1	1050–1100	Масло	58
4X8B2	1025–1075	Масло	45
7X3	850–880	Масло	54
8X3	850–880	Масло	55
5XHM	830–860	Масло	47
4X5B2ФC	1030–1050	Воздух	50
4XC	880–900	Масло	47
6XC	840–860	Масло	56
8XBГ	850–900	Масло	57
5XB2C	860–900	Вода	53
6XB2C	860–900	Масло	57

Быстрорежущие инструментальные стали предназначены в основном для изготовления режущих инструментов, работающих при температуре 560–725 °C, содержат 6–18 % W, 3–4 % Cr, 1–3 % V и другие элементы. Марки быстрорежущих сталей, химический состав и технические требования установлены ГОСТ 19265-73 (табл. 14).

Таблица 14

Теплостойкость быстрорежущих сталей

Нормальная теплостойкость	Повышенная теплостойкость		Высокая теплостойкость
P6M3	P9Ф5	10P8M3	B3M12K23
P6M5	P9K5	P12Ф3	B11M7K23
P8M3	P9K10	P12Ф4K5	B18M4K25
P9	P10K5Ф5	P8M3K6C	B18M7K25
P12	P14Ф4	P9M4K8Ф	3B20K16XФ
P18	P18Ф2K5	P12M3A2K8	25B20K25XФ

По ТУ 14-1-2804-79 и ТУ 12-2998-80 поставляются порошковые быстрорежущие стали марок Р6М5К5-МП и Р6М5Ф3-МП для изготовления крупногабаритного режущего инструмента сложной формы.

Быстрорежущие стали в первой колонке табл. 14 – умеренной (нормальной) теплостойкости (615–625 °С), во второй и третьей колонках – повышенной теплостойкости (625–650 °С), высокой теплостойкости (700–725 °С) – в четвертой колонке. Для обработки конструкционных сталей с твердостью до 220–230 *HV* применяют быстрорежущие стали умеренной теплостойкости, а для резания конструкционных сталей с высокой твердостью до 450 *HV* аустенитных жаропрочных и коррозионностойких сталей применяют быстрорежущие стали повышенной и высокой теплостойкости.

Быстрорежущие стали ВЗМ12К23, В11М7К23 и т. д., расположенные в 4-й колонке табл. 14, имеют интерметаллидное упрочнение и применяют их для резания титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов.

Таким образом, быстрорежущие стали предназначены для изготовления режущего инструмента (отрезные, резьбовые, расточные, фасонные, строгальные и долбежные резцы, сверла, метчики, плашки, различные фрезы, долбяки, шаберы, пилы машинные и ручные для обработки древесины, ножовочные полотна, напильники и др.), подшипников качения, деталей дизельной топливной аппаратуры, тяжело нагруженных штампов холодного деформирования и других деталей, работающих при температурах до 615–725 °С, что значительно выше, чем для других инструментальных сталей.

### Порядок проведения лабораторной работы

#### Оборудование, инструмент и материалы:

1. Прибор для определения твердости по методу Роквелла.
2. Детали, работающие в различных условиях эксплуатации (не менее 5 наименований).

#### Последовательность выполнения этапов работы:

1. Выполнить 4 измерения твердости рабочей поверхности детали.
2. Записать показания прибора в протокол 1.

### Протокол 1 – Результаты измерения твердости различных деталей

Название детали	Значение твердости, <i>HRC</i>				
	1	2	3	4	Среднее значение
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					

3. В соответствии с индивидуальным заданием (прил. 2), пользуясь рекомендациями методического указания, выбрать марку стали для деталей. В соответствии с заданной твердостью, пользуясь рекомендациями методического указания и таблицами (прил. 3), для каждой детали назначить режим термической обработки. Все данные внести в протокол 2.

### Протокол 2 – Выбор материалов и режимов термической обработки

Наименование детали (марка стали)	Твердость	Режим термообработки				
		Отжиг		Закалка		Отпуск
		$t_{\text{нагрева, } ^\circ\text{C}}$	Условия охлаждения	$t_{\text{нагрева, } ^\circ\text{C}}$	Охлаждающая среда	
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						

4. Составить отчет по работе.

### Содержание отчета:

1. Цель работы.
2. Общие сведения об углеродистых и легированных сталях.
3. Протокол с результатами исследований.
4. Протокол с результатами индивидуального задания.
5. Выводы.

### Контрольные вопросы:

1. Что такое сталь?
2. Как маркируются углеродистые стали?
3. Как маркируются легированные стали?
4. Как классифицируются стали по назначению?
5. Какие свойства материала учитываются при выборе стали для конкретной детали?
6. Какие бывают виды термической обработки?
7. Что такое отжиг?
8. Что такое закалка?
9. Что такое отпуск?
10. Какие стали подвергаются закалке?

### Литература

1. Арзамасов Б. Н. Материаловедение. / Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин [и др.]. Изд. 2-е. М. : Машиностроение, 1986. 648 с.
2. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов : справочник / под ред. В. И. Баранова. М. : Машиностроение, 1996. 399 с.
3. Дриц М. Е. Технология конструкционных материалов и материаловедение / М. Е. Дриц, М. А. Москалев. М. : Высшая школа, 1990. 446 с.
4. Краткий справочник металлиста / под ред. П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова. Изд. 3-е. М. : Машиностроение, 1987. 164 с.
5. Лахтин Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. Изд. 2-е. М. : Машиностроение, 1980. 493 с.
6. Марочник сталей и сплавов / под ред. В. Г. Сорокина. М. : Машиностроение, 1989. 640 с.
7. Машиностроительные материалы : краткий справочник / под ред. В. М. Раскатова. Изд. 3-е. М. : Машиностроение, 1980. 511 с.

8. Термическая обработка в машиностроении : справочник / под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта. М. : Машиностроение, 1980. 255 с.

9. Фетисов Г. П. Материаловедение и технология металлов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карман, В. М. Матюшин [и др.]. М. : Высшая школа, 2000. 638 с.

10. Шилов Н. А. Выбор материала деталей машин : методическое указание / Н. А. Шилов, В. А. Валетов. Горки : БСХА, 1992. 44 с.

11. Капцевич В. М. Материалы для деталей сельскохозяйственных машин и инструмента : методические указания / В. М. Капцевич, В. И. Ефремов, Т. К. Романова. Минск : БГАТУ, 2002. 51 с.

## Лабораторная работа 2

### **ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ЕЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ**

*Цель работы:* изучить основные методы химико-термической обработки; ознакомиться с оборудованием для химико-термической обработки; изучить материалы, применяемые для различных методов химико-термической обработки; изучить изменение структуры и свойств стали после цементации.

*Студент должен знать:* физическую сущность методов химико-термической обработки;

*уметь:* выбрать материал и способ поверхностного упрочнения детали.

#### **Общие сведения**

Большинство деталей современных машин работает под действием статических и динамических нагрузок при обычных и повышенных температурах, вызывающих быстрый износ, коррозию, разрушение поверхностных слоев деталей. Работоспособность техники в условиях эксплуатации определяют надежность и долговечность ее деталей.

Различного рода очаги разрушения металла деталей (микротрещины, коррозия и т. д.) зарождаются на их поверхности по причине термодинамической нестабильности, обусловленной нарушениями межатомных связей, наличием точечных и линейных дефектов, субмикротрещин, примесей и др., выраженной в значительно большей степени по сравнению с сердцевидными зонами металла. Поэтому структурно-энергетическое состояние поверхности существенно отличается от состояния внутренних зон металла, что и предопределяет ее большую уязвимость различного рода разрушениями в условиях эксплуатации элементов конструкции машины.

В этой связи возникает необходимость изменения состояния поверхности металла в направлении увеличения ее стабильности и повышения сопротивляемости разрушениям. Это достигается различными методами упрочнения поверхности детали как при ее производстве, так и при восстановлении.

Классификация методов упрочнения поверхности деталей машин предусматривает две принципиальные группы методов упрочнения (восстановления):

- 1) упрочнение без изменения химического состава поверхности, но с изменением ее структуры;
- 2) упрочнение с изменением химического состава поверхности и ее структуры.

Для обеих групп упрочнения характерным является изменение состояния поверхности, которое особенно выражено для методов второй группы.

Упрочнение методами первой группы достигается поверхностной закалкой, поверхностной пластической деформацией и др.

Вторая группа упрочнения осуществляется различными методами химико-термической обработки (ХТО) и методами наложения защитных слоев. Эти методы осуществляются многочисленными видами технологических процессов (плазменное упрочнение, лазерное, ионно-плазменное, электроискровое упрочнение и др.).

Для упрочнения методами ХТО характерным является воздействие тепловой энергии на поверхность металла упрочняющего вещества в молекулярно-атомарном состоянии, при котором диффузионный процесс происходит в пределах всей толщины защитного слоя. Благодаря диффузионной природе защитного слоя наиболее полно реализуются межатомные связи. Вследствие чего адгезионная связь слоя с поверхностью оказывается очень высокой и способствует обеспечению надежности защитного слоя.

В случае наложения защитных слоев размер детали увеличивается на толщину нанесенного слоя, что делает этот способ упрочнения особенно эффективным при восстановлении изношенных или поврежденных коррозией поверхностей. При ХТО изменение размеров менее заметно. Оно определяется разностью удельных объемов фаз, составляющих диффузионный слой и металлическую основу детали.

Поэтому метод ХТО следует рекомендовать, в основном, для упрочнения деталей при их производстве, а для восстановления только на промежуточных (профилактических) стадиях ремонта.

В практике в настоящее время (из методов упрочнения без изменения химического состава поверхности, но с изменением ее структуры) наиболее распространены методы поверхностной закалки и лазерной обработки, а из способов упрочнения с из-

менением химического состава поверхности и ее структуры – методы ХТО.

Выбор метода поверхностного упрочнения детали зависит от марки выбранной стали, условий ее эксплуатации, формы, размеров и др.

### Химико-термическая обработка стали

Химико-термическая обработка металлов – обработка металлов нагретом в химически активной среде. Изменяет химический состав, структуру и свойства поверхностного слоя металла. Чтобы улучшить свойства сердцевины и поверхностного слоя, после или до большинства процессов химико-термической обработки проводят термическую обработку. Химико-термическая обработка, в зависимости от особенностей диффундирующего элемента, воздействует на различные свойства металла – твердость, износостойкость, усталостную прочность, эрозионную стойкость, красностойкость, может предотвращать схватывание металлов, улучшать противозадирные свойства, повышать сопротивление поверхности металла воздействию внешних агрессивных сред при нормальной и повышенных температурах.

ХТО заключается в насыщении поверхностного слоя стали различными элементами (С, N, Al, Cr, Si, В и др.) путем их диффузии в атомарном состоянии из насыщающей среды (твердой, газовой, жидкой, паровой) при высокой температуре.

Физические основы химико-термической обработки заключаются в следующем:

- 1) образование активных атомов насыщающего элемента (диссоциация);
- 2) поглощение (растворение) атомов насыщающего элемента поверхностью металла (адсорбция);
- 3) проникновение насыщающего элемента вглубь (диффузия).

В результате образуется диффузионный слой, на поверхности которого концентрация диффундирующего элемента наибольшая.

В зависимости от насыщающего элемента, существуют следующие разновидности химико-термической обработки:

- а) цементация – насыщение стали углеродом;
- б) азотирование – насыщение стали азотом;
- в) цианирование – одновременное насыщение стали углеродом и азотом;
- г) борирование – насыщение стали бором и т. д.

*Насыщение стали металлами называется диффузионной металлизацией.* В зависимости от насыщающего металла существуют следующие процессы:

- алитирование (насыщение алюминием);
- хромирование (насыщение хромом);
- силицирование (насыщение кремнием) и т. д.

Практическое значение для сельхозмашиностроения имеют технологические процессы цементации, азотирования, цианирования, борирования, алитирования, диффузионного хромирования. Но наиболее широко используется цементация вследствие экономичности, недефицитности насыщающей среды.

### Цементация

*Цементация заключается в насыщении стали углеродом для придания деталям машин высокой твердости и износостойкости поверхности при сохранении вязкой и пластичной сердцевины.* Окончательные свойства цементированные изделия приобретают после закалки и низкого отпуска. Цементируются детали, изготовленные из малоуглеродистой (некалящейся) стали с содержанием углерода 0,1–0,3 %. Суть цементации – в создании поверхностного слоя из высокоуглеродистой стали. Цементации подвергаются детали, работающие в условиях контактного износа и приложения знакопеременных нагрузок: среднеразмерные зубчатые колеса, втулки, поршневые пальцы, кулачки, валы коробок передач автомобилей, отдельные детали рулевого управления и т. д.

В зависимости от состояния насыщающей среды, называемой «карбюризатором», различают цементацию в твердом, газовом и жидком карбюризаторах. Температура цементации изменяется в интервале 880–1000 °С.

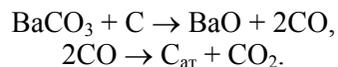
**Цементация в твердом карбюризаторе.** Цементируемые детали вместе с карбюризатором загружают в ящики, герметически упаковывают, выдерживают при 930 °С. Скорость насыщения 0,1–0,2 мм/ч. После цементации ящики охлаждают на воздухе до 400–500 °С, а затем раскрывают. В качестве карбюризатора применяют смесь древесного угля или каменноугольного полукокса с углекислым барием и кальцием. Для контроля протекания процесса и толщины цементованного слоя в ящик закладывают свидетели-образцы диаметром 10–15 мм из той же марки стали, которые периодически вынимают и определяют глубину слоя. Широко приме-

няют карбюризатор, состоящий из древесного угля, 20–25 %  $\text{BaCO}_3$  и 3,5 %  $\text{CaCO}_3$ . Рабочая смесь, применяемая для цементации, состоит из 20–25 % свежего карбюризатора и 80–75 % отработанного.

В цементационном ящике имеется воздух, кислород которого при высокой температуре взаимодействует с углеродом карбюризатора, образуя оксид углерода. Оксид углерода в присутствии железа диссоциирует по уравнению:



Механизм действия активизатора сводится к увеличению количества в ящике  $\text{CO}$ :



Существенным недостатком цементации в твердом карбюризаторе является большая длительность процесса, невозможность регулирования содержания углерода в слое, необходимость прогрева малотеплопроводной массы карбюризатора, высокая стоимость подготовительных операций (ручная укладка деталей в ящики, приготовление карбюризатора и т. д.). Однако универсальность и простота цементации в твердом карбюризаторе обуславливает применение ее в мелкосерийном и единичном производстве.

**Газовая цементация.** Этот процесс осуществляют нагревом изделия в среде газов, содержащих углерод. Газовая цементация имеет ряд преимуществ по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе. В этом случае можно получить заданную концентрацию углерода в слое, скорость процесса составляет  $\approx 0,2$  мм/ч, что сокращает длительность процесса. При этом обеспечивается возможность полной механизации и автоматизации процессов, включая и последующую термическую обработку деталей.

При газовой цементации в качестве карбюризатора используют природные газы, состоящие из метана ( $\text{CH}_4$ ) и пропанбутановых смесей. Также применяют жидкие углеводороды (керосин, синтин, спирты и др.), каплями подаваемые в печь. Углеводородные соединения при высокой температуре разлагаются с образованием активного углерода и водорода.

В серийном производстве газовую цементацию обычно проводят в шахтных печах. В крупносерийном и массовом произ-

водства газовую цементацию проводят в безмуфельных печах непрерывного действия.

Разработаны новые методы цементации: высокотемпературная вакуумная цементация; цементация в тлеющем разряде (ионная цементация); цементация в кипящем слое; цементация в расплавленных солях (жидкостная цементация); цементация пастами. В то же время самым распространенным промышленным методом является газовая цементация.

**Структура цементационного слоя.** Цементационный слой имеет переменную концентрацию углерода по толщине, уменьшающуюся от поверхности к сердцевине детали. Различают три основные зоны (рис. 1).

За глубину цементационного слоя принимают сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половины доэвтектоидной зоны, где количество феррита и перлита составляет по 50 %.

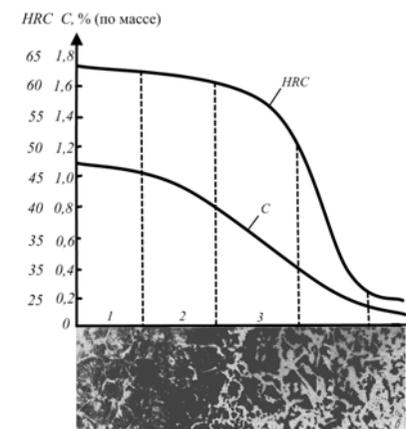


Рис. 1. Структура стали после цементации:

- 1 – заэвтектоидная зона, состоящая из перлита и цементитной сетки;
- 2 – эвтектоидная зона, представляющая собой перлит;
- 3 – доэвтектоидная зона, в которой по мере приближения к сердцевине уменьшается количество углерода, перлита, а количество феррита возрастает

**Термическая обработка цементованной стали и свойства упрочненных деталей.** Окончательные свойства стальных деталей достигаются в результате термической обработки, выполняемой после цементации. Этой обработкой можно исправить структуру и

измельчить зерно сердцевины и цементованного слоя, получить высокую твердость в поверхностном слое (56–60 HRC) и хорошие механические свойства сердцевины (26–40 HRC); устранить карбидную сетку в цементованном слое, которая может возникнуть при насыщении его углеродом до заэвтектоидной концентрации.

В большинстве случаев, особенно при обработке наследственно мелкозернистых сталей, применяют закалку выше точки  $A_{c3}$  (сердцевины) при 820–850 °С. Это обеспечивает измельчение зерна и полную закалку цементованного слоя и частичную перекристаллизацию и измельчение зерна сердцевины. После газовой цементации часто применяют закалку без повторного нагрева, а непосредственно из цементационной печи после предварительного охлаждения изделий до 840–860 °С, для уменьшения коробления обрабатываемых изделий. Такая обработка не исправляет структуры цементованного слоя и сердцевины, поэтому непосредственную закалку применяют только в том случае, когда изделия изготовлены из наследственно мелкозернистой стали. Для уменьшения деформации цементованных изделий выполняют также ступенчатую закалку в горячем масле (160–180 °С).

В результате термической обработки поверхностный слой приобретает структуру мелкоиглочатого мартенсита и изолированных участков остаточного аустенита (не более 15–20 %). Большое значение имеет прокаливаемость, под которой понимают способность стали образовывать структуру мартенсита с HRC 59–62 на заданном расстоянии от поверхности (толщина слоя до 0,8–1,1 мм). Карбиды уменьшают прокаливаемость, играя роль готовых центров распада аустенита, снижая его устойчивость.

Заключительной операцией термической обработки стальных деталей после цементации во всех случаях является низкий отпуск при 160–180 °С, переводящий мартенсит закалки в поверхностном слое в отпущенный мартенсит, снимающий напряжения.

*Углеродистые качественные стали*, содержащие  $\leq 0,25\%$  С (стали 10, 15, 20, 25), применяются для изготовления цементируемых деталей, от которых требуется высокая поверхностная твердость и допустима невысокая прочность сердцевины, и используются сравнительно редко.

*Хромистые стали* (15Х, 20Х, 20ХФ) применяются для небольших деталей, работающих на износ в условиях трения, при средних удельных давлениях и скоростях.

*Хромомарганцевые стали* (18ХГТ, 25ХГТ, 20ХГР) дополнительно легированные Ti, Mn, В – применяется для изготовления ответственных деталей, работающих при больших скоростях, средних и высоких удельных давлениях, при наличии ударных нагрузок. Сталь склонна к внутреннему окислению при газовой цементации, что снижает прокаливаемость слоя и предел выносливости. Марганец повышает прокаливаемость цементируемого слоя, устраняет вредное влияние внутреннего окисления.

### *Азотирование*

*Азотированием называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом.* Азотирование производят при температурах 500–1200 °С. Твердость азотированного слоя заметно выше, чем твердость цементованного, и сохраняется при нагреве до высоких температур (450–500 °С), тогда как твердость цементованного слоя, имеющего мартенситную структуру, сохраняется только до 200–225 °С. В результате азотирования поверхность приобретает низкую склонность к задирам и высокую сопротивляемость износу, высокие предел выносливости и кавитационную стойкость, хорошую сопротивляемость коррозии в таких средах, как атмосфера, пресная вода, пар и др.

В зависимости от температуры азотирование подразделяется на низкотемпературное (до 600 °С) и высокотемпературное (600–1200 °С). Низкотемпературное азотирование проводят в различных насыщающих средах. Газовое азотирование проводят преимущественно в диссоциированном аммиаке  $NH_3$  (25–60 %). На обрабатываемой поверхности происходит диссоциация  $NH_3$  с образованием ионов азота, которые адсорбируются поверхностью и диффундируют вглубь металла. При жидком азотировании используют расплавы цианид-цианатных солей.

Твердость азотированного слоя составляет HV 4500–5500 МПа. Поэтому азотированию подвергают среднеуглеродистые стали, легированные Cr, Mo, V, Al, которые приобретают высокую твердость и износостойкость при азотировании. В легированной стали на поверхности образуются легированные фазы, образующие нитриды. Такие элементы, как Cr, Mo, V и другие, растворенные в феррите (подслои), повышают растворимость азота в  $\alpha$ -фазе и образуют специальные нитриды. Комплексное легирование хромом, алюминием, молибденом позволяет повысить твердость до

12 000 МПа. При низкотемпературном азотировании толщина азотированного слоя обычно 100–400 мкм, а время проведения процесса 20–60 ч. При высокотемпературном азотировании толщина слоя обычно 250–400 мкм, а время проведения процесса 6–10 ч.

В зависимости от марки азотируемой стали и условий эксплуатации детали, из нее изготавливаемой, практикуется термообработка до или после азотирования. Азотированный слой хорошо поддается шлифованию и полированию.

**Стали для азотирования.** Для деталей, работающих в условиях трения скольжения, склонных к короблению (деформациям) и испытывающих небольшие контактные нагрузки, для поверхностного упрочнения рекомендуется азотирование. Азотированию могут подвергаться практически все легированные стали.

Азотирование изделий является одним из основных методов повышения предела выносливости. Надрезы, царапины, резкие переходы сечений, отверстия и другие концентраторы напряжений, понижающие предел выносливости, после азотирования практически не оказывают ослабляющего влияния. Влияние азотирования тем сильнее, чем меньше поперечное сечение детали и больше концентраторы или технологические концентраторы напряжений.

Сжимающие остаточные напряжения на поверхности азотированного слоя достигают 600–800 МПа. Наивысшего значения  $\sigma_{-1}$  достигает при сравнительно небольшой толщине азотированного слоя.

При дальнейшем увеличении толщины слоя предел выносливости или не изменяется или уменьшается (на 10–20 %) вследствие снижения уровня напряжений сжатия в слое. Разрушение азотированных деталей обычно начинается под слоем. Чем выше температура азотирования, тем ниже абсолютное значение предела выносливости. Это связано с разупрочнением сердцевины и уменьшением остаточных напряжений сжатия в упрочненном слое.

Контактная усталостная прочность у конструкционных сталей после азотирования ниже, чем у цементированных, но выше, чем у стали, прошедшей поверхностную закалку при индукционном нагреве. При повышенных контактных напряжениях эффективная толщина азотированного слоя (до  $HV$  500) должна быть не менее 0,45–0,5 мм. Азотирование повышает сопротивление стали кавитационной эрозии и фреттинг-коррозии.

Твердость азотированного слоя (на поверхности), в зависимости от состава стали и режима азотирования, может колебаться в широких пределах от  $HV$  600 до 1200.

Износостойкость азотированной стали в 2–4 раза выше износостойкости цементированной стали.

Для деталей, эксплуатационная надежность которых определяется поверхностной твердостью и износостойкостью, применяют сталь 38Х2МЮА, обеспечивающую после азотирования при 500–520 °С наибольшую твердость на поверхности ( $HV$  1100–1200). Однако этой стали свойственен ряд недостатков. В частности, азотированный слой на стали 38Х2МЮА нередко хрупок за счет образования на поверхности и по границам исходных зерен легированной алюминидом  $\gamma$ -фазы  $(Fe, Al)_4N$ . В настоящее время для деталей, подвергаемых азотированию, чаще применяют стали, не содержащие алюминия 20Х13, 30Х13, 30Х3МФ1, 16Х3НВФМВ, 40ХН2МА, 25Х3Н3МФ и др.

Азотирование широко применяют для мало- и средненагруженных зубчатых колес сложной конфигурации, например, с внутренними зубьями и др., шлифование которых трудно осуществить. В этом случае зубчатые колеса изготавливают из стали 40Х (конические) или 40ХФА (цилиндрические). После азотирования на глубину 0,1–0,13 мм, в результате которого обеспечивается минимальная деформация, проводится только притирка или хонингование зубьев.

### **Нитроцементация**

*Нитроцементацией называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температуре 840–860 °С в газовой среде, состоящей из науглероживающего газа и аммиака. Продолжительность процесса 4–10 ч. Установлено, что при одновременной диффузии углерода и азота ускоряется диффузия углерода. Процесс проводят при более низкой температуре (840–860 °С вместо 910–930 °С при цементации). После нитроцементации следует закалка непосредственно из печи, реже, после повторного нагрева, применяют и ступенчатую закалку. После закалки проводят отпуск при 160–180 °С. Структура обработанного слоя после нитроцементации, как и после цементации, состоит из мелкокристаллического мартенсита и остаточного аустенита, но в ней присутствует небольшое количество дисперсных, равномерно распределенных карбонитридов. Азота в слое должно быть 0,10–0,15 %, а углерода 1,0–1,65 %. Твердость слоя после закалки и низкого отпуска –  $HRC$  58–60. Нитроцементации обычно подвергают детали сложной конфигурации, склонные к короблению в крупносерийном и массовом производстве, на автомобильных и тракторных заводах.*

## Борирование

Борирование – насыщение поверхностных слоев металлов и сплавов бором, которое проводят преимущественно с целью повышения их поверхностной твердости, износостойкости, а также коррозионной стойкости.

Борированный слой состоит из двух зон (рис. 2): зоны боридов – химических соединений бора и железа ( $\text{FeB}$  и  $\text{Fe}_2\text{B}$ ) и переходной зоны – твердого раствора бора в железе. Боридная зона (боридный слой) имеет характерное игольчатое строение. Иглы боридов, срастаясь в основании, образуют сплошной боридный слой. Легирующие элементы в сталях не образуют собственных боридов, а легируют бориды железа.

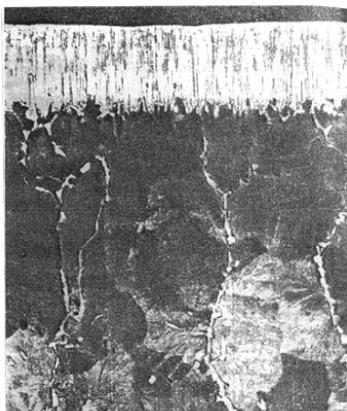


Рис. 2. Борированный слой на поверхности детали, изготовленной из стали 20Х

Под боридной зоной располагается переходная зона, отличающаяся от сердцевины по структуре. Она состоит из твердого раствора бора (углерода и легирующих элементов) в железе.

Характерным свойством боридных слоев является высокая твердость. Борид  $\text{FeB}$  в боридном слое армко-железа имеет твердость  $H_{100} = 19\ 500\text{--}21\ 000$  МПа, а борид  $\text{Fe}_2\text{B}$  твердость  $H_{100} = 13\ 800\text{--}14\ 500$  МПа. Высокая твердость боридов сохраняется до температуры  $700\text{ }^\circ\text{C}$ . Однако боридные слои обладают высокой хрупкостью, что может являться причиной скалывания при удлинении или сжатии более 1–2 %.

Даже при абразивном изнашивании высокая твердость определяет износостойкость большую в 6–10 раз по сравнению с закаленной и низкоотпущенной сталью.

Для защиты сталей от окисления нецелесообразно применять борирование. В этом отношении более эффективны другие способы ХТО (хромирование, алитирование и др.).

Борированные стали обладают высокой коррозионной стойкостью в водных растворах соляной, серной, фосфорной кислот. В растворах азотной кислоты боридные слои неустойчивы и быстро разрушаются. Борированные стали устойчивы в разбавленных водных растворах плавиковой кислоты. По стойкости в 50 % уксусной кислоте боридные слои уступают только хромовым и хромоникелевым покрытиям.

Борирование производят в порошках, в жидких и газовых средах. Наиболее перспективны для промышленного использования следующие методы и способы борирования: в порошкообразных смесях с использованием герметизированных контейнеров; в расплавах солей и оксидов (электролизное и без электролиза); газовое; из паст (обмазок).

Перед борированием поверхность изделий очищают от окалины, ржавчины, смазки и других загрязнений. Местную защиту поверхности деталей от насыщения бором производят путем нанесения гальванических покрытий из меди, латуни, бронзы, хрома или путем нанесения обмазки на основе оксида алюминия.

При борировании в порошковых смесях в качестве носителя бора чаще всего применяется технический карбид бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ). В порошковых смесях борирование производят при температуре  $860\text{--}1050\text{ }^\circ\text{C}$  при времени выдержки в печи 2–10 часов.

Электролизное борирование чаще всего производят в расплаве буры ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 10\text{H}_2\text{O}$ ) при температуре  $880\text{--}980\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 2–5 часов.

Газовое борирование осуществляют путем разложения газообразных соединений бора: диборана, треххлористого бора и других боросодержащих газов. Процесс газового борирования в смеси  $\text{B}_2\text{H}_6 + \text{H}_2$  с заметной скоростью идет, начиная с  $550\text{ }^\circ\text{C}$ . Оптимальными считают температуры  $800\text{--}950\text{ }^\circ\text{C}$ .

Борирование из обмазок (паст) целесообразно применять при необходимости упрочнения крупногабаритных изделий или для местного борирования отдельных участков деталей. Чаще всего в качестве основных составляющих смеси используются  $\text{B}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ . Смесь изготавливается в виде пасты, а затем наносится на деталь и

подсушивается. Подготовленные таким образом изделия можно нагревать любым известным в настоящее время способом. Температура нагрева при борировании из паст 850–1100 °С.

Режим борирования назначают, исходя из требуемой толщины слоя. При этом необходимо помнить, что для каждой группы сталей существует определенная максимальная толщина боридного слоя, превышать которую не рекомендуется. Для нелегированных, низко- и среднелегированных малоуглеродистых сталей эта толщина составляет 0,25–0,30 мм, для нелегированных, низко- и среднелегированных среднеуглеродистых сталей – 0,20–0,25 мм и для высоколегированных низко-, средне- и высокоуглеродистых сталей – 0,05–0,10 мм.

Выбор метода борирования диктуется не столько стоимостью процесса, сколько его технологичностью, условиями производства, конфигурацией, размерами, условиями работы и достигаемой степенью повышения стойкости упрочняемых изделий.

Средне- и тяжелонагруженные детали после борирования подвергают термообработке (закалке и отпуску). Закалку желательнее производить с температуры борирования или с более низких температур с предварительным подстуживанием. Нагрев при термообработке в печах с воздушной атмосферой недопустим.

При выборе режимов закалки и отпуска необходимо учитывать следующее: опасность образования трещин и сколов увеличивается с повышением скорости охлаждения, толщины боридного слоя и размеров изделий; при прочих равных условиях количество дефектов уменьшается в следующей последовательности: объемная закалка на мартенсит, изотермическая закалка, закалка токами высокой частоты. Температуру отпуска выбирают в зависимости от требуемых свойств основного металла.

Борированные изделия механической обработке, как правило, не подвергают. Однако, в случае необходимости, их шлифуют. Для шлифования борированных поверхностей целесообразно использовать алмазные или эльборовые круги. Допускается также полировка алмазными пастами.

## Порядок проведения лабораторной работы

### Оборудование, инструмент и материалы:

1. Металлографические микроскопы МИМ-7.
2. Образцы микроструктур стали после цементации, цементации и последующей закалки и отпуска.

### Последовательность выполнения этапов работы:

1. Изучить основные методы ХТО.
2. Изучить микроструктуру стали после цементации.
3. Изучить микроструктуру стали после цементации и последующей закалки.
4. Выбрать способ ХТО и назначить режим термической обработки для деталей, представленных в прил. 4 (согласно индивидуальному заданию).
5. Составить отчет по работе.

### Содержание отчета:

1. Цель работы.
2. Сведения об основных методах ХТО.
3. Схемы микроструктур стали после цементации.
4. Выбрать способ ХТО и назначить режим термической обработки для деталей согласно индивидуальному заданию.
5. Выводы (сравнение способов упрочнения стальных деталей).

### Вопросы для контроля:

1. Что называется химико-термической обработкой?
2. Физическая сущность химико-термической обработки.
3. Объясните процесс цементации.
4. Какую термическую обработку проводят после цементации?
5. Какие существуют методы цементации?
6. Объясните процесс азотирования стали.
7. Какую предварительную термическую обработку проводят перед азотированием?
8. Объясните процесс борирования стали.
9. Преимущества и недостатки различных методов ХТО.

## Литература

1. Фетисов Г. П. *Материаловедение и технология металлов* / Г. П. Фетисов [и др.]. М. : Высшая школа, 2005. 861 с.
2. Арзамасов Б. Н. *Материаловедение* / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин [и др.] / под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. М. : МГТУ им. Баумана, 2002. 648 с.
3. Мозберг Р. К. *Материаловедение* / Р. К. Мозберг. М. : Высшая школа, 1991. 448 с.
4. Худокормов Р. Н. *Материаловедение : лаб. практик. : учеб. пособие для вузов* / Р. Н. Худокормов, Ф. И. Пантелеенко. Минск : Высшэйшая школа, 1988. 224 с.

## Лабораторная работа 3

### **ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, СВОЙСТВ, ПРИМЕНЕНИЯ И СТРОЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

*Цель работы:* ознакомиться с основными принципами получения деталей методами порошковой металлургии и областями их применения, а также со структурными особенностями порошковых материалов.

*Студент должен знать:* общую схему технологического процесса получения изделий методами порошковой металлургии; классификацию порошковых материалов по назначению и применению; особенности структуры порошковых материалов;

*уметь:* при микроструктурном исследовании порошковых материалов определять их структурные составляющие; на основании анализа микроструктур определять свойства и области применения порошковых материалов.

#### **Общие сведения**

Порошковой металлургией называется область техники, охватывающая процессы получения порошков металлов и металлоподобных соединений, а также процессы изготовления изделий из них без расплавления. Порошковые материалы (зачастую их называют спеченными материалами) – это консолидированные материалы, полученные из порошков, а порошки – совокупность частиц твердого вещества и (или) их агрегатов с размерами от 0,001 мкм до 1 мм.

Основными достоинствами порошковой металлургии, как метода изготовления материалов и изделий, являются:

- возможность изготовления материалов и изделий из них, которые практически не удастся получить традиционными способами (пористые материалы, жаропрочные, инструментальные композиции, материалы со специальными свойствами);
- возможность использования отходов металлургического и машиностроительного производства в виде окалины, стружки, гальва-

нических шламов и т. п. в качестве исходного сырья для производства порошковых изделий;

– возможность существенного снижения отходов за счет производства изделий с размерами, близкими к окончательным, и исключение обработки резанием.

Типовая технологическая схема получения изделий методами порошковой металлургии включает следующие операции:

- производство порошков металлов и др. материалов;
- формование заготовки из порошка со связкой или без нее путем прессования или свободной насыпки;
- спекание заготовки при температуре ниже температуры плавления основного компонента;
- дополнительная обработка спеченного изделия – механическая обработка, пропитка, нанесение покрытий, калибрование и др.

Приведенная технологическая схема позволяет, во-первых, изготавливать порошковые материалы и изделия с такими составами, структурами и свойствами, которые невозможно получить традиционными металлургическими методами (литьем, обработкой давлением, термообработкой) и, во-вторых, изготавливать изделия с заданными составами, структурой и свойствами, но с существенно меньшим расходом материалов и более точными размерами.

К недостаткам порошковой металлургии можно отнести:

- ограниченность в выборе форм и размеров изготавливаемых изделий и заготовок;
- сравнительно невысокое рафинирование по примесям, что, например, препятствует использованию методов порошковой металлургии в изготовлении монокристаллов и полупроводников.

Однако эти недостатки могут быть устранены за счет изготовления составных изделий или применения комплекса технологических процессов, включающих наряду с порошковой металлургией другие технологии.

### Методы получения металлических порошков и их свойства

Все современные методы получения порошков можно условно подразделить на механические и физико-химические.

*Механические методы* – это такие технологические процессы, при которых исходный материал под воздействием внешних сил измельчается без существенного изменения химического состава.

К механическим методам относятся: дробление и размол в различных мельницах, распыление струи расплавленного металла водой или струей сжатого газа, обработка металла резанием с получением частиц, а не сливной стружки.

*Физико-химические методы* – это такие технологические процессы, при которых получение порошка связано с изменением химического состава исходного сырья. При этом конечный продукт – порошок, как правило, отличается от исходного материала по химическому составу.

К физико-химическим методам относятся: восстановление порошков оксидов и других соединений, электролиз водных растворов и расплавленных солей, диссоциация карбониллов при нагреве и др.

В табл. 1 приведены основные промышленные и опытно-промышленные методы получения порошков используемых в технологии порошковой металлургии.

Таблица 1  
Промышленные и опытно-промышленные методы  
получения порошков

Способ получения порошка	Исходное сырье	Материал порошка
<i>Механические методы</i>		
Диспергирование твердых металлов		
Дробление	Электролитические осадки, продукты восстановления металлов	Железо, титан, медь, никель
Размол	Металлическая стружка, кусочки проволоки, чешуйки	Железо, сталь, бронза
Диспергирование расплавов		
Распыление сжатым воздухом (RZ-метод), аргоном, азотом	Расплав распыляемого металла	Медь, бронза, железо, коррозионно-стойкие стали

Окончание табл. 1

Способ получения порошка	Исходное сырье	Материал порошка
Распыление водой под давлением (W-метод)	То же	Медь, бронза, железо, коррозионно-стойкие стали
<i>Физико-химические методы</i>		
Восстановление газом (водород, конвертированный природный газ, эндогаз, генераторный газ, диссоциированный аммиак), углеродом (сажа, графит, древесный уголь, кокс)	Окалина, рудный концентрат, химические соединения, чистые оксиды, их смеси	Железо, вольфрам, молибден, никель, медь, высоколегированные стали и сплавы
Металлотермическое восстановление натрия, магнием, кальцием или гидридом кальция	Оксиды, галогениды металлов, смесь железного порошка с оксидами металлов	Титан, высоколегированные стали и сплавы
Электролиз водных растворов	Растворы сульфатных солей металлов	Медь, никель, железо, вольфрам, молибден, сплавы Fe-Ni, Fe-Ni-Mo, Ni-Cu
Разложение карбониллов	Восстановленная губка соответствующего металла	Никель, железо, сплавы Fe-Ni-Mo, Fe-Ni-Co, Fe-Ni-Mn

### Формование порошков

Формование – это придание заготовкам из порошка формы, размеров, плотности и механической прочности, необходимых для последующего изготовления изделий из порошковых материалов.

Методы формования подразделяются на две группы: с приложением и без приложения давления.

**Формование с приложением давления.** К этой группе относятся прессование в закрытых пресс-формах, изостатическое прессование, прокатка и мундштучное прессование.

Наиболее распространенным является прессование в закрытых пресс-формах, применяемое при изготовлении изделий простой формы (диск, конус, втулка и т. д.). Различают одностороннее и двустороннее прессование. Одностороннее прессование применяют для формования изделий с отношением высоты к диаметру не более 1 (рис. 1а). При большем отношении применяют двустороннее прессование (рис. 1б–г).

Важным фактором при заполнении пресс-формы порошком является обеспечение равномерного распределения порошка в пресс-форме и горизонтальности его поверхности. Для получения прессовок с высокой производительностью используется прессование по ограничителю высоты. Прессование по заданному давлению обеспечивает одинаковую плотность прессовок во всем их объеме.

Процесс формования рассматриваемым методом включает такие основные операции, как дозирование засыпки порошка в матрицу пресс-формы, прессование, удаление брикета из пресс-формы. От правильного выбора массы порошка зависит точность заданных размеров и форм изделий.

На практике дозировку порошка осуществляют по массе или по объему, причем выбор способа определяется в основном типом прессового оборудования.

Прессы, используемые в порошковой металлургии, по типу привода, направлению нагружения и степени автоматизации классифицируются следующим образом: гидравлические и механические; вертикальные (верхнего и нижнего давления) или горизонтальные (как правило, только гидравлические); автоматизированные и неавтоматизированные. В свою очередь механические прессы бывают кривошипные, кривошипно-коленные, кулачковые и карусельные. Выбор типа прессы определяется количеством, требуемым качеством, формой, размерами прессуемого изделия, необходимой пористостью заготовки, а также производительностью прессы и его пригодностью для выполнения данных работ.

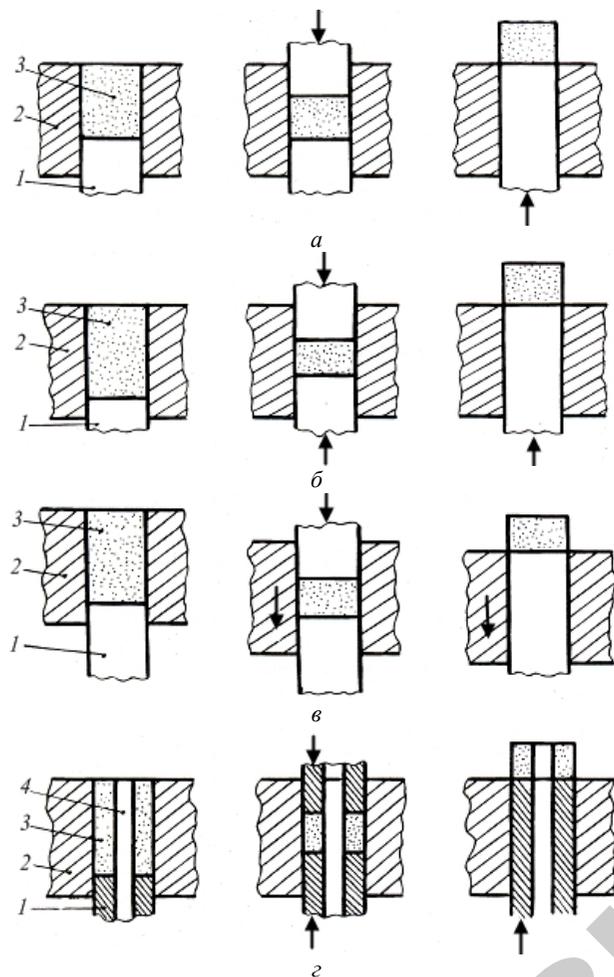


Рис. 1. Схемы одностороннего (а), двустороннего прессования с неподвижной (б) и подвижной (в) матрицами, двустороннего прессования втулок (г): 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – порошок; 4 – стержень

К недостаткам метода прессования в закрытых пресс-формах следует отнести ограниченность числа типоразмеров получаемых изделий, а также неравномерное распределение пористости в прессовках из-за сил трения, возникающих между частицами порошка

и между порошком и стенками пресс-формы. Преимуществами метода являются высокая точность размеров изделий и большая производительность процесса.

*Изостатическое прессование* – это метод прессования порошка в эластичной оболочке при всестороннем сжатии. Разновидностью данного процесса является гидростатическое и газостатическое прессование, а также прессование в толстостенных эластичных оболочках (рис. 2), помещенных в стальную пресс-форму.

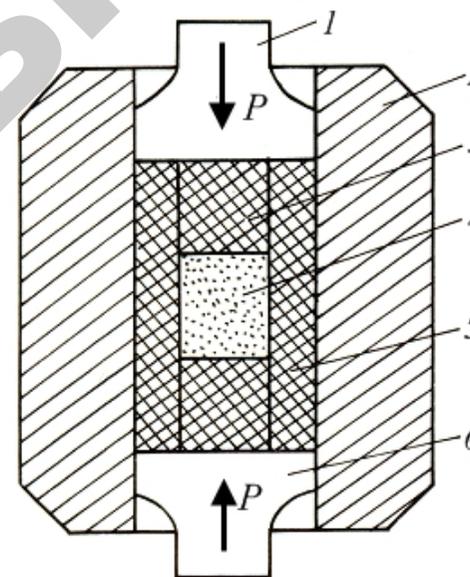


Рис. 2. Схема двустороннего прессования в эластичной оболочке: 1 – верхний пуансон; 2 – матрица; 3 – пробка; 4 – порошок; 5 – эластичная оболочка; 6 – нижний пуансон

*Метод гидростатического прессования* основан на передаче давления жидкости в сосуде высокого давления металлическому порошку, заключенному в тонкую эластичную оболочку (рис. 3). В качестве рабочей жидкости используют водные эмульсии различных масел, глицерин, чистые минеральные масла, а также воду с добавками ингибитора ржавчины. В качестве материала для оболочек применяют резину, полиуретан и металлическую фольгу. Давление прессования, как правило, не превышает 15–20 МПа.

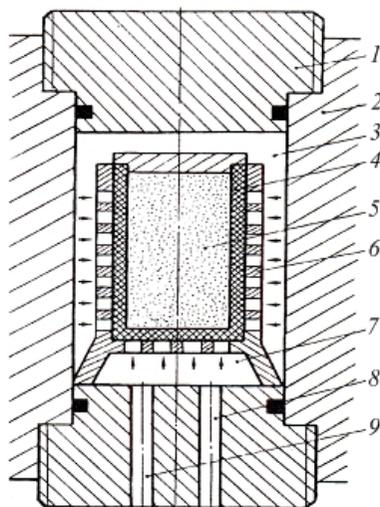


Рис. 3. Схема установки для гидростатического прессования:  
 1 – верхний затвор; 2 – камера высокого давления; 3 – жидкость под высоким давлением; 4 – эластичная оболочка; 5 – порошок; 6 – перфорированный короб; 7 – нижний затвор; 8 – ввод жидкости высокого давления; 9 – отверстие для слива жидкости

К недостаткам прессования в гидростатах относятся трудность получения изделий с точными геометрическими размерами, относительно высокая стоимость изготовления изделий, невысокая производительность процесса. Достоинством метода является возможность получения изделий больших размеров и сложной формы с равномерным распределением плотности.

*Прокатка порошков* – это непрерывное формование заготовок из порошков между валками. Процесс реализуется на прокатных станах и осуществляется различными способами (рис. 4), отличающимися расположением плоскости осей прокатных валков (вертикальная, горизонтальная и наклонная прокатка) и подачей порошка (гравитационная, принудительная). Сущность метода заключается в подаче порошка из бункера в зазор между двумя вращающимися навстречу друг другу валками.

Основным достоинством прокатки является возможность изготовления лент и полос шириной до 450 мм и толщиной до 5 мм. К недостаткам относятся возможность изготовления проката лишь простейших форм и невысокая его прочность.

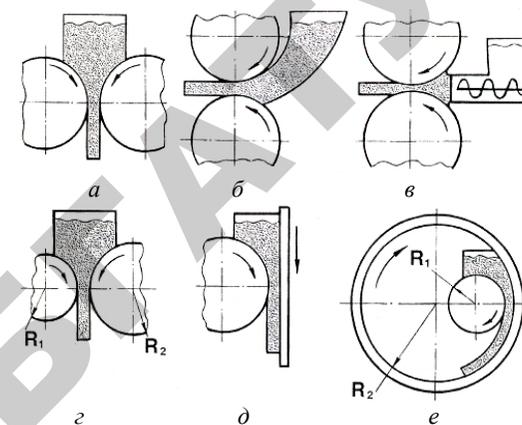


Рис. 4. Схемы прокатки порошка:  
 а – вертикальная; б – горизонтальная; в – горизонтальная с принудительной подачей порошка; г – вертикальная с валками различного диаметра; д – вертикальная с подвижной плитой; е – с вращающимися наружным и внутренним валками

*Мундштучное прессование* – формование заготовок из смеси порошка с пластификатором путем продавливания ее через отверстие в мундштуке или фильере (рис. 5). В качестве пластификатора применяют спиртовые растворы бакелита, крахмальный клейстер, парафин и др. Его массовая доля обычно составляет 6–10 %.

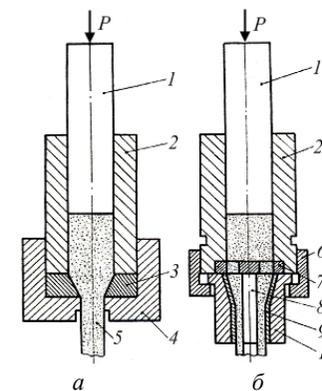


Рис. 5. Схема мундштучного прессования стержней (а) и труб (б):  
 1 – пуансон; 2 – стакан; 3 – конус; 4 – матрица; 5 – спрессованная заготовка; 6 – гайка; 7 – звездочки; 8 – игла; 9 – мундштук; 10 – обойма

Мундштучным прессованием получают трубы и стержни большой длины (до 1 м) с равномерным распределением пористости по длине изделий.

**Формование без приложения давления.** К этой группе относятся свободная засыпка порошка в форму и шликерное литье.

*Свободная засыпка порошка в форму* – простейший способ формования изделий без приложения давления. Для лучшего заполнения форм порошком и устранения «арочного эффекта» форму при засыпке подвергают вибрации (вручную или на вибровстряхивателе). На конечную пористость порошка в форме существенное влияние оказывают ускорение и частота вибраций.

Основное требование к материалу формы – отсутствие взаимодействия с материалом порошка при спекании. Для порошков цветных металлов применяют стальные или графитовые формы, а для черных металлов – керамические. Теоретически габариты заготовок, сформованных свободной засыпкой порошка в формы, не ограничиваются – они определяются размерами формы и рабочего пространства печи для спекания.

*Шликерное литье* – формование заготовок путем заливки шликера, представляющего собой однородную концентрированную суспензию порошка в жидкости, в пористую форму с последующей сушкой. Как правило, шликером наполняют гипсовую форму, являющуюся негативом требуемой конфигурации изделия (рис. 6). После заполнения большая часть жидкости впитывается гипсовой формой, частицы твердой фазы подсыхают и прочно сцепляются между собой. Затем форму открывают, подсыхшую отливку извлекают и подвергают окончательной сушке и спеканию.

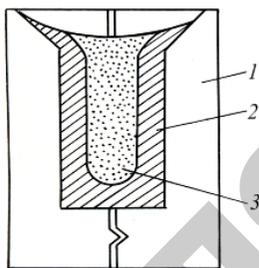


Рис. 6. Схема шликерного литья:  
1 – разъемная гипсовая форма; 2 – сформованная заготовка;  
3 – остаток шликера

Для изготовления шликера используют дисперсные порошки (1–2 мкм, но не более 10 мкм), так как при применении более грубых порошков не удастся получить устойчивую и однородную суспензию. В качестве связующей жидкости для порошков неокисляющихся металлов применяют воду, для окисляющихся – спирты. Для предупреждения образования коагулянтов в растворе применяют специальные добавки типа соляной или уксусной кислот, щелочи, альгинаты аммония или натрия и др. Как правило, массовая доля твердой фазы в шликере составляет 40–70 %. Процесс шликерного литья можно интенсифицировать, вакуумируя форму, создавая избыточное давление на шликер, или просто нагревая шликер. Шликерным литьем изготавливают изделия сложной формы и больших размеров, которые трудно получить традиционными методами порошковой металлургии.

### Спекание

Спекание сформованных заготовок является одной из важнейших технологических операций, применяемых при изготовлении изделий методами порошковой металлургии, назначение которой состоит в придании спекаемым телам определенной структуры и соответствующих физико-механических, гидравлических и химических свойств. Сущность процесса спекания состоит в том, что в сформованном порошковом теле имеется свободная энергия повышенного уровня в виде энергии на поверхности раздела между фазами порошка и среды, энергии на границах зерен, избыточной энергии кристаллической решетки и др. Уменьшение свободной энергии возможно в результате переноса вещества в зоны межчастичных контактов и соединения контактирующих друг с другом частиц порошка. Для протекания этого процесса необходима определенная энергия активации, обеспечиваемая соответствующим нагревом порошковой заготовки.

Под спеканием понимается термически активируемый, самопроизвольный или инициируемый внешним воздействием переход системы контактирующих твердых тел или пористой среды в термодинамически равновесное состояние за счет уменьшения площади свободной поверхности.

Фактически спекание заключается в нагреве сформованной заготовки и выдержке в нагретом состоянии в течение определенного времени. Спекание проводят при температуре 0,7–0,9 абсолютной

температуры плавления наиболее легкоплавкого компонента смеси (твердофазное спекание), в отдельных случаях (твердые режущие сплавы) температура спекания может превышать температуру плавления наиболее легкоплавкого компонента. Этот вид спекания называется жидкофазным. В процессе спекания при повышенных температурах активизируются диффузионные процессы, что приводит к увеличению размеров контактов между частицами порошка, уменьшению объема пор, увеличению прочности прессовки. Плотность и прочность спекаемых изделий существенно зависят от атмосферы, в которой проводят спекание. Восстановительные среды (водород, диссоциированный аммиак) предпочтительнее нейтральных газов (аргон), так как восстановление оксидных пленок на частицах порошка ускоряет спекание. Качественно и быстро проходит спекание в вакууме. Длительность выдержки при спекании – от получаса до нескольких часов.

Разработанные в настоящее время методы и технологические приемы порошковой металлургии позволяют, с одной стороны, получать изделия, не уступающие литым и кованным деталям того же химического состава, а с другой – создавать новые материалы со свойствами, которые не могут быть получены обычными методами.

### **Области применения порошковых материалов и изделий**

Порошковые материалы по назначению можно условно разделить на антифрикционные, фрикционные, электротехнические, конструкционные, инструментальные. В некоторых случаях принадлежности порошковых материалов к той или другой группе условны, так как материал по определенным признакам может одновременно принадлежать к нескольким названным выше группам.

#### ***Порошковые антифрикционные материалы***

*Антифрикционные материалы* – материалы, используемые в несущих или направляющих узлах, обладающие повышенной износостойкостью и низким коэффициентом трения. Антифрикционные порошковые материалы широко используются в машиностроении, в том числе в сельхозмашиностроении, приборостроении, пищевой, фармацевтической и других отраслях промышленности в узлах, работающих в самых разных условиях эксплуатации.

Антифрикционные материалы в зависимости от условий работы должны обладать:

- хорошей начальной прирабатываемостью в работе, т. е. время, необходимое для снижения коэффициента трения между подшипником и валом до заданной величины, должно быть минимальным;
- высокими триботехническими свойствами (коэффициент трения  $\leq 0,3$ , в том числе при наличии смазки  $< 0,1$ ;  $Pv$  в зависимости от режима работы от 20 до 40,0 МПа·м/с при скорости скольжения ( $v$ ) от 2 до 200 м/с и нагрузках ( $P$ ) от 45 до 0,2 МПа);
- способностью выдерживать нагрузку, скорость и температуру без разрушения и изменения формы и функциональных свойств;
- способностью образовывать самосмазывающиеся или легко притирающиеся продукты истирания коллоидного характера (пленку), которые могут сберечь шейку вала от износа даже при затрудненной смазке;
- меньшей твердостью, чем у шейки вала, причем твердость должна снижаться как можно меньше в процессе нагрева;
- высокой теплопроводностью для хорошего отвода теплоты трения;
- достаточной выносливостью или сопротивлением усталости;
- достаточной вязкостью в случае ударной нагрузки;
- хорошими технологическими свойствами;
- микропористостью или микрокапиллярностью, способствующими удержанию смазки на поверхности антифрикционного материала;
- хорошими антикоррозионными свойствами.

Материалами, удовлетворяющими приведенным требованиям, долгое время являлись литые материалы на основе меди, главным образом, оловянистые бронзы, однако они не всегда соответствуют эксплуатационным характеристикам современных машин и механизмов.

В настоящее время существует значительное количество порошковых антифрикционных материалов, которые широко используются в изделиях общего машиностроения, работающих в обычных условиях, и в изделиях специального назначения, эксплуатирующихся в сложных условиях.

Широкое распространение в производстве получили пористые подшипники скольжения на основе порошков железа и меди, получаемые по традиционной для порошковой металлургии технологии.

Пористые антифрикционные материалы на основе железа являются самыми распространенными. Они успешно конкурируют с литыми сплавами типа баббитов и бронз.

*Пористое железо* – это наиболее простой тип материалов, имеющий структуру феррита. При обильной смазке длительная работоспособность пористого железа обеспечивается при нагрузках 2,0–2,5 МПа и скорости скольжения 1–2 м/с ( $Pv = 2,5\text{--}5,0$  МПа·м/с). При эксплуатации рабочая температура подшипника из пористого железа не должна превышать 70–80 °С.

Пористое железо после пропитки пор маслом применяют в качестве прядильных колец, подшипников аппаратуры, приборов, счетно-решающих устройств и т. д.

**Железографитовые материалы.** Применение железографитовых материалов в узлах трения особенно предпочтительно при затруднительной подаче регулярной смазки или недопустимости ее применения в условиях сильной запыленности среды, частых пусках и остановках механизмов, при больших нагрузках и малых скоростях скольжения, например, направляющие втулки, подшипники валов с возвратно-поступательным движением.

Основными компонентами для изготовления железографитовых материалов являются: железный порошок, графит и в небольших количествах медь, сера и фосфор. В железографитовые материалы вводят в основном от 1 до 4 % графита. Графит в антифрикционных материалах выполняет двойное действие: растворившийся в железе, увеличивает прочность металлической основы, а не растворившийся – является твердой смазкой.

Антифрикционные свойства железографитовых материалов определяются их самосмазываемостью, хорошей прирабатываемостью, износостойкостью, прочностью. Самосмазываемость происходит за счет масла, выступающего в процессе трения из поровых каналов, что выгодно отличает пористые антифрикционные материалы от литых. Выступление масла на поверхность трения объясняется различным объемным тепловым расширением масла и металлической основы материала, а впитывание в поровые каналы – межмолекулярными силами, действующими в жидкости в случае, если температура не превышает критических значений. Высокий эффект самосмазывания пористых вкладышей, пропитанных маслом, обуславливает образование на поверхностях трения граничных слоев масла, сплошность которых зависит от средней температуры процесса.

Длительность работы подшипников из железографитовых материалов определяется условиями их работы и не превышает 3–5 тыс. ч. Их применяют в тепловозостроении, в узлах трения сельскохозяйственных машин, для изготовления втулок угольных транспортеров, деталей автомобилей, сверлильных станков, втулок прокатных станов и других целей.

Композиции железо–медь–графит способны обеспечивать работоспособность подшипников при непрерывной подаче смазки и  $Pv$  до 7,0 МПа·м/с. Для работы в условиях ограниченной смазки рекомендуются композиции с повышенным содержанием графита (4–15 %) и меди (4–12 %). Материал ЖГр4Д7 (4 % С и 7 % Cu) обеспечивает работоспособность узлов трения в режиме самосмазывания при скорости скольжения 0,94 м/с и нагрузке 1,0–4,5 МПа с коэффициентом трения 0,1. Композиции железо–медь и железо–медь–графит способны выдерживать статические нагрузки до 60–790 МПа. Дальнейшее улучшение железографитовых материалов достигается при их легировании фосфором, марганцем, цинком, оловом. Разработаны сплавы на основе железа с повышенными антифрикционными и антикоррозийными свойствами для деталей, работающих при больших нагрузках.

В узлах трения с высокими скоростями скольжения даже при небольших нагрузках могут развиваться значительные температуры, которые вместе с силами инерции способствуют удалению смазки из области трения, что создает трудности при использовании жидких или консистентных смазок. Для таких узлов, работающих в условиях сухого трения, одним из обязательных условий работоспособности узлов является создание и постоянная регенерация на их поверхности защитных разделительных пленок, исключаящих контакт ювенильных металлических поверхностей и последующее схватывание.

Для улучшения триботехнических свойств материалов, работающих в таких условиях, широко используют различные вещества, которые наносят на трущиеся поверхности в качестве твердой смазки. К ним относятся сульфиды, селениды, йодиды, хлориды, фториды, нитриды и оксиды металлов.

Тонкие слои твердых смазок, наносятся на поверхность трущихся деталей, но они сравнительно легко смываются жидкостями или удаляются при механическом воздействии. Эффективным методом образования стабильной разделительной пленки на трущихся поверхностях является введение твердой смазки непосредственно

в материал. Однако применение твердых смазок в спеченных железистографитовых материалах ограничено, так как при спекании при высоких температурах возможно их разложение.

Первыми порошковыми антифрикционными материалами на основе меди, которые начали применяться в промышленности, были оловянистые бронзы. Оптимальные антифрикционные и механические свойства обеспечиваются при 9–11 % Sn. Пористость обычно составляет  $\Pi = 15\text{--}35\%$ ;  $\sigma_{\text{в}} = 76\text{--}140$  МПа;  $\delta \approx 5\%$ ;  $P_v = 1,5\text{--}2,5$  МПа·м/с.

Пористые бронзы применяют для изготовления подшипников, работающих в легких условиях, характеризующихся малыми скоростями скольжения  $< 1,5$  м/с и небольшими нагрузками 0,5–1,0 МПа. В условиях дополнительной смазки предельная нагрузка может составить 8 МПа при  $v = 1$  м/с. С повышением скорости скольжения до 6 м/с нагрузка снижается до 1 МПа.

Широкое распространение получили спеченные самосмазывающиеся подшипники скольжения из композиций бронза–графит, в которых содержание графита обычно составляет 2–4 %; 8–10 % Sn и 86–90 % Cu (по массе).

Перспективными триботехническими материалами для подшипников скольжения являются износостойкие спеченные хромооловянистые и хромоникелеоловянистые бронзы с твердыми смазками.

При работе в особых условиях вследствие значительной износостойкости для узлов трения применяют тугоплавкие металлы и соединения.

На основе карбида вольфрама изготавливают кольца, шарики и седла клапанов со свойствами: твердость  $HV$  9,5–18 ГПа,  $\gamma = 11,5\text{--}15$  г/см<sup>3</sup>,  $\sigma_{\text{в}} = 120\text{--}280$  МПа и  $\alpha = (5\text{--}6) \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>. Повышенной твердостью, прочностью, вязкостью, устойчивостью к абразивному износу, термической стабильностью и инертностью к агрессивным средам обладает новый класс материалов на основе боридов титана, циркония и гафния, содержащих 87,5–70 % боридов и 12,5–30 % порошка металла этой группы.

Для подшипников скольжения, работающих при повышенных температурах, применяют композиции W–BN. Износостойкость композиций определяется содержанием боридов BN.

### **Фрикционные материалы**

В настоящее время большинство машин и механизмов оснащено фрикционными устройствами того или иного назначения. Движе-

ние машины, ее остановка и маневрирование, изменение режима эксплуатации механизма и его управление невозможны без применения фрикционных тормозных либо передаточных устройств, работа которых во многом определяет их технические характеристики.

В связи с жесткими условиями работы тормозных устройств современных машин фрикционные материалы должны иметь:

- высокую фрикционную теплостойкость, т. е. сохранение устойчивого значения коэффициента трения и низкого износа в широком диапазоне температур;

- достаточную стойкость против истирания. Уровень требуемой износостойкости устанавливается в зависимости от условий эксплуатации и находится в пределах от 0,01–0,02 до 0,10–0,15 мкм за рабочий цикл;

- достаточную коррозионную стойкость и способность не корродировать с сопряженными деталями.

Кроме того, элементы фрикционной пары не должны схватываться (свариваться) как в процессе, так и после торможения. Для таких материалов весьма существенным является полное использование трущихся поверхностей, т. е. получение максимально возможной контактной поверхности. При этом видимая площадь трения должна составлять не менее 80 % номинальной, а поверхности трения должны быть гладкими, без задиrow.

Особые требования предъявляют к фрикционным материалам также и в отношении физико-механических свойств – они должны обладать высокой механической прочностью при рабочих температурах. В процессе эксплуатации не должно происходить скалывания и расслоения, образования глубоких трещин и выкрашивания компонентов материала, которые могут нарушить нормальную работу узла.

Из всех известных в настоящее время материалов наиболее полно всем этим требованиям отвечают порошковые фрикционные материалы, которые состоят из металлических и неметаллических компонентов. Металлические компоненты придают материалу прочность, неметаллические повышают коэффициент трения и уменьшают склонность к заеданию. Благодаря таким особенностям, эти материалы могут работать при высоких нагрузках и скоростях проскальзывания и характеризуются более высокой износостойкостью, чем другие фрикционные материалы.

Применение порошковых материалов во фрикционных узлах обеспечивает плавность их включения, стабильность коэффициента трения и повышенную долговечность.

Для работы в масле применяют разнообразные порошковые фрикционные материалы, в которых в качестве металлической связи используют медь, легированную, в основном, оловом или алюминием.

Для работы в тяжелых условиях эксплуатации (трение без смазки) применяют порошковые фрикционные материалы на железной основе. Эти материалы характеризуются более высокими фрикционными и механическими свойствами по сравнению с материалами на основе меди.

Основные области применения порошковых фрикционных изделий можно классифицировать следующим образом:

– передаточные устройства, работающие всухую: слабонагруженные (тракторы, станки и др.), средненагруженные (чеканочные и штамповочные прессы, промышленный транспорт), тормоза для работы без смазки, тяжелонагруженные (самолеты);

– сцепления, работающие со смазкой: средненагруженные (автоматические трансмиссии, станки, управления тракторов) и тяжелонагруженные (силовые трансмиссии в тракторах).

В гидротрансмиссиях автомобилей Белорусского и Могилевского автомобильных заводов применяют порошковые фрикционные диски с накладками из материала на основе меди. Максимальные давления в этих узлах достигают 10 МПа, а максимальная скорость – 60 м/с. Безотказная работа гидротрансмиссий в основном обеспечивается применением порошковых изделий.

В колесных тормозах автогрейдера применение порошковых фрикционных дисков позволило увеличить срок службы тормозов в 10 раз.

Новые фрикционные материалы на основе порошковых материалов внедрены на Минском тракторном заводе в тормозах и предохранительных муфтах тракторов «Беларус». Срок службы узлов при этом увеличился до 8–10 тыс. часов.

### *Электротехнические материалы*

Порошковые материалы находят все более широкое применение в электротехнике, электромашиностроении, аппаратостроении, автоматике и телемеханике, радиотехнике, радиоэлектронике и других отраслях промышленности. На их основе изготавливают различные детали со специальными свойствами.

В электротехнической промышленности широко применяют различные типы разрывных и скользящих контактов. Несмотря на имеющееся в настоящее время большое количество разработанных материалов для электрических контактов различного назначения,

проблема создания высоконадежных электрических контактов полностью еще не решена. Требования, предъявляемые к материалу контактов, непрерывно возрастают и изменяются. Материалы должны быть термически, химически и механически стойки, иметь малое электросопротивление, в том числе и контактное, и обладать высокими теплопроводностью и эрозионной стойкостью при воздействии электрической дуги, сопротивляемостью свариваемости при замыкании и размыкании контактов.

Технологические приемы производства электрических контактов методом порошковой металлургии весьма разнообразны, они обеспечивают возможность получения изделий не только требуемого химического состава, но и с заданной структурой, определяющей оптимальное сочетание свойств.

Разрывные электроконтакты используют для замыкания электроцепей в высоко- и низковольтных, в том числе и слаботочных, электрокоммутирующих аппаратах и приборах. Наиболее подходящими для них являются материалы: вольфрам, молибден, тантал и рений. Их свойства удовлетворяют многим требованиям, предъявляемым к контактным материалам: высокая температура плавления, повышенные прочностные характеристики, требуемые значения критических сил тока и напряжения, электроэрозионная стойкость, сопротивление свариваемости, их оксиды летучи и электропроводны.

Однако эти металлы обладают малой электро- и теплопроводностью, высоким контактным сопротивлением. Перечисленных недостатков лишены серебро, медь, золото, платина и другие металлы платиновой группы. Они имеют высокую электро- и теплопроводность, коррозионную стойкость, низкое контактное сопротивление. Эти металлы широко используют в промышленности как контактные материалы, хотя они являются остроредными и дорогостоящими. Поэтому чаще всего в качестве материалов разрывных контактов применяют композиционные материалы.

По составу разрывные контакты делят:

1) на металлические одно- (Ag, W, Mo, Au, Pt и др.), двух- (Ag–Ni, Ag–Mo, Ag–W, Cu–W, Cu–Mo, Au–W, Au–Mo, Fe–Cu и др.), трех- и более компонентные (Ag–Ni–Cd; Ag–Ni–Cu; W–Cu–Ni; W–Ag–Ni; Fe–Cu–Bi; Ag–Pd–Au; Ag–Pd–Ni; Ag–Ni–Cd–Te);

2) металлографитовые (Ag–C; Cu–C);

3) металлооксидные (Ag–CdO; Ag–CuO; Ag–ZnO; Ag–ZrO<sub>2</sub>; Ag–Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; Ag–HfO<sub>2</sub>; Ag–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Ag–CdO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Ag–Ni–CdO; Ag–Cu–CdO и др.);

4) металлокарбидные, металлоборидные или металлонитридные (Ag–WC; W–WC; Cu–Ni–WC; Me–TiC; TiB<sub>2</sub>; TiN или Me–ZrB<sub>2</sub>, ZrN и др.).

Скользящие электроконтакты представляют собой пару трения, в которой, наряду с низким контактным сопротивлением, должен обеспечиваться и низкий коэффициент трения. При этом контактная пара не может состоять из однотипных материалов, так как в этом случае будет возможно схватывание трущихся поверхностей в условиях эксплуатации. Твердость материалов, составляющих контактную пару, также должна быть различной. Желательно, чтобы материал токонесущего элемента был более твердым, чем подвижный контакт. Для улучшения антифрикционности и обеспечения соотношения твердостей в состав материала вводят твердые смазки (дисульфид молибдена, сульфид цинка, фтористый кальций, графит, селениды некоторых редких металлов и др.) или легкоплавкие металлы (например, галлий), которые становятся жидкими при работе контактной пары.

Скользящие контакты применяют в виде пластин, стержней, цилиндров, проволочек и т. п. В качестве основы материала скользящего контакта используют чаще всего медь или серебро.

Наиболее распространенным является метод, связанный с прессованием и спеканием шихты из порошка меди с различными углеродсодержащими материалами. Многие металлографитовые щетки изготавливают из смесей порошков меди и природного графита, большая часть щеток содержит, кроме графита, и другие углеродистые составляющие, которые вводят для повышения характеристик прочности, улучшения износостойкости и снижения контактного сопротивления. Такими добавками являются пек, сажа или коксовая мелочь, резина.

При изготовлении меднографитовых скользящих контактов, которые широко применяются для электрощеток, необходимо создать медный каркас, придающий материалу максимальную электропроводность.

Бронзографитовые контакты содержат 2–5 % графита и 70–80 % меди, остальное – олово, железо, никель. Их используют для изготовления коллекторных пластин, пантографов для двигателей электропоездов.

Серебрянографитовые контакты содержат 2–50 % графита и работают они в точных измерительных приборах либо в сухом

состоянии, либо в масляной среде при скоростях до 0,33 м/с и нагрузке 0,05–0,02 МПа.

Скользящие контакты на основе порошкового материала легированного серебра готовят из смеси порошков соответствующих компонентов. В качестве антизадирных присадок используют MoS<sub>2</sub>, WS, MoSe, WSe, ZnS, ReS, и легирующие добавки Sn, Ni, Cd, Te, Co, Pd. Вводят также дополнительные оксиды: MnO, CdO. Контакты на основе серебра работают при значениях токов от микроампер до единиц ампер в различных климатических условиях.

В качестве материалов скользящих электроконтактов предложен также ряд материалов на основе железа и никеля. Для токоприемников троллейбусов, трамваев, электровозов применяют сплав, содержащий 32,0–83,0 % Fe и 0,2–17,0 % C, пропитанный композицией, содержащей капролактан, гексаметилендиамин, дипиновую кислоту и формиат меди.

Магнитно-мягкие материалы широко применяют в электро- и радиотехнике, автоматике и телемеханике, радиоэлектронике, приборостроении. Изготовление магнитно-мягких изделий литьем трудоемко, потери материала составляют до 60–80 %. Расчеты показывают, что себестоимость магнитно-мягких спеченных деталей на 30–60 % ниже себестоимости тех же деталей, изготовленных путем обработки на металлорежущих станках из компактного материала.

Наиболее широко применяемыми в промышленности магнитно-мягкими материалами являются чистое железо, сплавы железа с никелем (типа пермаллоя), с кремнием и алюминием (типа альсифера), с хромом или алюминием и др. Сплавы типа пермаллоя получают как из механической смеси порошков, так и из порошков, полученных путем совместного осаждения карбониллов железа и никеля.

Для изготовления постоянных магнитов многих электро- и радиоприборов применяются так называемые магнитно-твердые сплавы, обладающие высокими значениями коэрцитивной силы и сравнительно большой остаточной магнитной индукцией.

Если сравнительно недавно порошковая металлургия была одним из методов получения магнитно-твердых материалов, обеспечивающим высокую технологичность, то за последние годы возникли новые классы этих материалов, которые могут быть получены только из порошков. К ним относятся магниты на основе сплавов кобальта с редкоземельными металлами, магниты на основе магнитно-твердых ферритов, на основе высокодисперсных порошков железа и его сплава с кобальтом, магниты на основе сплавов

марганца с висмутом и алюминием. Широкое распространение получили сплавы на основе железа типа Fe–Ni–Al–Co с добавками различных элементов.

### *Порошковые конструкционные материалы*

Наиболее распространенными видами порошковых изделий являются конструкционные детали, применяемые в машинах, механизмах и приборах. В зависимости от условий работы порошковые конструкционные детали подразделяют на ненагруженные, мало-, средне- и сильнонагруженные. Типовыми деталями из порошковых конструкционных материалов являются шестерни, кулачки, звездочки, зубчатые колеса, накладки, шайбы, колпачки, заглушки, храповики, накладные и специальные гайки, крышки, фланцы, седла и корпуса клапанов, статоры, диски и роторы насосов, муфты, кольца, ограничители, детали мерительных инструментов и другие детали сложной конфигурации, применяемые в различных отраслях машиностроения и приборостроения. Детали могут быть выпущены в виде готовых изделий или заготовок, которые требуют незначительного объема механической обработки. Несмотря на существенные преимущества, вопрос об изготовлении деталей машин и приборов методами порошковой металлургии определяется исходя, в основном, из экономических соображений, и главную роль здесь играет высокая стоимость пресс-форм. Экономически целесообразно изготавливать конструкционные детали методами порошковой металлургии лишь при массовом их производстве, т. е. при производстве около 50 000 штук на 1 пресс-форму.

Ненагруженные и малонагруженные конструкционные детали изготавливают из углеродистой стали. Их получают из смеси порошков железа и графита.

При изготовлении шестерен традиционными методами литья и механической обработки в стружку уходит до 60 % высококачественного металла. Метод порошковой металлургии позволяет в основном устранить указанные недостатки и даже имеет некоторые дополнительные преимущества, заключающиеся в изготовлении шестерен с определенной пористостью (5–15 %) и пропитывании их маслом, которое со свободным графитом, имеющимся в спеченной шестерне, образует коллоидно-графитовую смазку, удерживаемую в порах силами поверхностного натяжения. Благодаря

наличию пор, пропитанных маслом, уменьшается износ и снижается шум шестерен при работе.

К высокотемпературным материалам относятся материалы из тугоплавких порошков или соединений и порошковые материалы на их основе.

Тугоплавкими принято считать металлы, температура плавления которых выше, чем у железа. Наибольшее применение в качестве высокотемпературных материалов нашли материалы из порошков вольфрама, молибдена, тантала, ниобия, титана. Порошковый вольфрам, тантал, ниобий, молибден применяются в атомной энергетике, радиотехнике, порошковый вольфрам и молибден – в производстве нитей накаливания. Порошковый молибден используется для изготовления нагревательных элементов электрических печей. Порошковый титан и его сплавы, благодаря высокой удельной прочности и коррозионной стойкости, находят широкое применение для деталей ракет, самолетов, в судостроении, для деталей химического машиностроения и в медицине.

### *Порошковые инструментальные материалы*

Инструментальные материалы – материалы, предназначенные для изготовления некоторых видов инструментов или их рабочих частей. Необходимыми свойствами инструментальных материалов являются высокая износостойкость и твердость, при этом желательно, чтобы они обладали достаточными вязкостью, жаропрочностью, жаростойкостью, прочностью. К традиционно используемым инструментальным материалам относятся инструментальные стали. В последнее время в связи с ужесточением условий работы инструмента, особенно режущего, весь он или его рабочие части (режущие кромки) изготавливают из сверхтвердых композиционных материалов на основе алмазов, керамик, твердых сплавов и др. Из инструментальных материалов изготавливают режущий инструмент, инструмент для обработки давлением (пресс-формы, штампы и др.), некоторые измерительные инструменты (калибры, скобы и пр.) и др. Современные инструментальные материалы позволяют выполнять обработку деталей с высокой точностью, при высоких скоростях резания, а изготовленный из них инструмент обладает высокой стойкостью при экстремальных режимах обработки.

**Твердые сплавы.** Одним из важнейших и широко распространенных материалов, получаемых методом порошковой металлургии

гии, является твердый сплав – гетерогенный керамико-металлический материал, характеризующийся комплексом высоких физико-механических свойств, особенно износостойкостью и высокой упругостью материала, и нашедший широкое применение в промышленности в качестве режущего инструмента. При получении твердых сплавов реализуются такие преимущества метода порошковой металлургии, как возможность получать композиционные материалы из компонентов с резко различной температурой плавления, возможность достижения уникального комплекса физико-механических свойств материала, а также применение безотходной технологии производства и повышение коэффициента использования металла.

*Твердые сплавы* (ТС) – керамико-металлические материалы, состоящие из карбидов тугоплавких металлов и пластичного связующего (металла или сплава) при содержании тугоплавкой фазы  $\geq 50\%$  (объемн.). Современные ТС получают из высших карбидов тугоплавких металлов и металлов железной группы (железа, никеля, кобальта) спеканием в присутствии жидкой фазы.

Различают карбидовольфрамовые (WC–Co), титановольфрамовые (WC–TiC–Co), титанотанталовольфрамовые (WC–TiC–TaC–Co) и безвольфрамовые твердые сплавы.

В стандартах вольфрамовые (вольфрамокобальтовые) сплавы обозначаются буквами ВК с прибавлением цифры, обозначающей содержание кобальта, например ВК6. Титановольфрамовые твердые сплавы обозначаются буквами ТК. Марки сплавов в пределах группы также характеризуют содержание компонентов. Так, марка Т15К6 обозначает титановольфрамовый сплав типа WC–TiC–Co, содержащий 15% TiC, 6% Co, остальное – WC. В обозначение титанотанталовольфрамовых сплавов входят три буквы: ТТК, в остальном обозначение аналогично обозначению титановольфрамовых сплавов, например ТТ17К12. Перечень всех марок, выпускаемых в настоящее время, можно найти в ГОСТ 3882-74.

К материалам, используемым для обработки резанием, предъявляют ряд высоких требований. Комплекс основных характеристик, изучающихся у материалов данного класса, можно разделить на следующие группы (по степени важности): I группа – твердость, временное сопротивление при изгибе; II группа – модуль упругости, температурный коэффициент линейного расширения; III группа –

окалиностойкость (напайваемость), температура схватывания со сталью, плотность, теплопроводность.

Некоторые свойства карбидовольфрамовых (WC–Co), титановольфрамовых (WC–TiC–Co) и титанотанталовольфрамовых (WC–TiC–TaC–Co) твердых сплавов приведены в табл. 2, а безвольфрамовых – в табл. 3.

Таблица 2

Некоторые свойства сплавов WC–Co, WC–TiC–Co и WC–TiC–TaC–Co

Марка	Состав % (по массе)				Твердость HRA	$\sigma_b$ , МПа	E, ГПа
	WC	TiC	TaC	Co			
ВК6	94	–	–	6	92	1420	620
ВК10	90	–	–	10	90	1600	560
Т5К7	88	5	–	7	90	1300–1600	550–590
Т15К6	79	15	–	6	92	800–1000	420
ТТ4К10	85	4	1	10	89–90	1700–1900	450
ТТ5К9	80,5	5	5,5	9	90–91	1700–2000	560
ТТ12К8	62	12	18	8	91–92	1200–1400	630

Таблица 3

Промышленные безвольфрамовые твердые сплавы

Марка твердого сплава	Тип карбида	Количество карбида	Ni, % (по массе)	Mo, % (по массе)	$\sigma_b$ , МПа	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Твердость HRA	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , К <sup>-1</sup>
ТМ1	(Ti, Nb) C	90	5,0	5,0	800	5,8	91,5	5,9
ТМ3	(Ti, Nb) C	64	21,0	15,0	1200	5,9	89,0	–
ТН-20	TiC	79	16,0	5,0	1000	5,5	89,5	7,1
ТН-30	TiC	69	24,0	7,0	1100	5,8	88,5	8,2
ТН-40	TiC	61	80,0	9,0	1150	6,0	87,0	–
КНТ-16	Ti (C, N)	74	19,5	6,5	1100	5,8	89,0	8,9

**Специальные марки твердых сплавов.** За последние годы разработаны новые твердые сплавы, которые применяют не только для обработки резанием, но и в качестве материалов, обладающих хорошей износостойкостью и высокой коррозионной стойкостью. Эти сплавы можно разделить на три группы:

- а) коррозионно-стойкие твердые сплавы;
- б) окалиностойкие твердые сплавы;
- в) термически обрабатываемые твердые сплавы.

Основой *коррозионно-стойких твердых сплавов* является карбид хрома. Сплавы с никелевой связкой отличаются высокой износостойкостью наряду с очень хорошей химической устойчивостью и окалинностью. Их рекомендуется применять для деталей, которые одновременно с износом подвергаются действию коррозии. Однако необходимо учитывать, что твердые сплавы на основе карбида хрома являются относительно хрупкими при ударных нагрузках.

В качестве *окалиностойких материалов* используют твердые сплавы на основе карбида титана, который является единственным карбидом, имеющим в сочетании со связующим металлом (никель, кобальт, хром) высокую стойкость против окисления, жаропрочность и термостойкость.

К *термообрабатываемым твердым сплавам* относится большая группа материалов, называемых карбидостаями, ферро-TiC и т. д., представляющих собой легированные спеченные стали с добавками сложных карбидов, преимущественно TiC.

Своеобразие таких твердых сплавов, содержащих 30–70 % (по массе) TiC, состоит в возможности применения всех видов термообработки, воздействующей на свойства стальных сплавов, что приводит к изменению физических и механических свойств сплава в целом.

**Минералокерамические твердые сплавы.** Высокая твердость и износостойкость керамических материалов на основе окиси алюминия позволяет использовать  $Al_2O_3$  в сочетании с некоторыми другими оксидами, а также карбидами переходных металлов IV–VI групп периодической системы элементов для изготовления режущих керамических материалов.

Минералокерамику применяют для получистовой и чистовой непрерывной обточки и расточки деталей из серых, ковких, высокопрочных и отбеленных чугунов, закаленных и улучшенных сталей, некоторых марок цветных металлов и сплавов, а также неметаллических материалов (графит и др.) при высоких скоростях резания (до 600–800 м/мин) без применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), для волочения при производстве проволоки цветных металлов и для изготовления износостойких деталей машин, подвергающихся интенсивному безударному абразивному износу (сопла, насадки). Обеспечивая высокую производительность при обработке различных материалов резанием, минералокерамика, однако, в силу специфичности ее свойств не может исключить необходимость применения твердых спеченных сплавов. Она лишь расширяет диапазон используемых режущих

материалов в той области, где может служить промежуточным звеном между твердыми сплавами и алмазосодержащими и другими сверхтвердыми композиционными материалами. Режущая керамика – ценное дополнение к твердым спеченным сплавам с хорошими перспективами увеличения ее использования.

Исходным материалом для производства режущей минералокерамики служит технический глинозем ( $\gamma-Al_2O_3$ ) чистотой 98,5–99,5 %. Такой глинозем обжигают при 1400–1600 °С, превращая его в  $\alpha$ -модификацию (корунд). Обожженный глинозем размалывают до зернистости 1–3 мкм (например, в шаровой мельнице); измельчение до крупности зерен менее 1 мкм нежелательно из-за увеличения хрупкости спеченного изделия.

Размолотый корунд подвергают обработке кислотами для отмывки железа, натертого в процессе размолла, промывают водой и высушивают.

Минералокерамический материал ЦМ-332 может быть со стеклофазой или без нее и представляет собой либо чистый оксид  $Al_2O_3$ , либо 97,0–99,5 %  $Al_2O_3$  (остальное –  $Cr_2O_3$  или  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MgO$ ).

Оксидно-металлическую керамику применяют как теплостойкий и окалиностойкий материал. Для получения режущего инструментального материала к  $Al_2O_3$  добавляют 2–10 % Mo или Cr, благодаря чему вязкость кермета улучшается по сравнению со спеченным чистым оксидом алюминия, а хрупкость уменьшается.

Горячепрессованная режущая оксидно-карбидная керамика ( $Al_2O_3$  с 20–40 %  $Mo_2C$  или сложного карбида  $Mo_2C-WC$ ) обладает высокой прочностью и твердостью. Изделия из материала марок ВЗ, ВОК-60 и ВОК-63 имеют соответственно плотность 4,20–4,60 г/см<sup>3</sup>;  $\sigma_B = 450–700$  МПа; твердость *HRA* 92–94. Режущий инструмент с механическим креплением неперетачиваемых пластин из такой минералокерамики обладает повышенными эксплуатационными свойствами, позволяющими увеличить производительность, повысить качество обработки изделий и снизить себестоимость операции в результате увеличения скорости резания в 2–3 раза с одновременным повышением стойкости в среднем в 5 раз по сравнению со сплавами ВКЗМ, Т30К4 и другими износостойкими твердыми сплавами при чистовой обработке деталей.

Высокие твердость и износостойкость твердых сплавов открыли для них многочисленные применения не только в качестве режущих материалов. Твердые сплавы широко применяют в приборостроении, машиностроении, горном деле и многих других областях.

Обширная область использования твердых сплавов – обработка металлов давлением (волочение, штамповка, прессование, калибровка). Твердые сплавы широко применяют в виде вставок к волокам.

В машиностроении и приборостроении твердые сплавы используют очень широко. Детали, которые раньше изготавливали из стали, в нагружаемых местах обязательно армируют твердыми сплавами, чаще всего типа ВК. Армирование проводят с помощью пайки мягким или твердым припоем. Все современные высокопроизводительные токарные станки оборудуют токарными центрами, армированными твердыми сплавами, ими армируют также зажимные кулачки и люнеты. У бесцентровых шлифовальных станков армируют быстро изнашивающиеся стальные направляющие полосы. В станкостроении многочисленные детали, ранее изготовлявшиеся из стали (упоры, упорные болты, направляющие втулки, криволинейные направляющие, сверлильные кондукторы, защелки механизма подачи, щупы, прижимные ролики и т. д.), в настоящее время армируют твердыми сплавами.

Часовая промышленность является одним из основных потребителей фасонных твердосплавных штампов.

Важной областью применения твердых сплавов являются сопла всех видов. Сопла для пескоструйной обработки, сопла воздуходувок, разбрызгивающие и распылительные сопла, стеклопрядильные сопла, мундштуки прессов и др. изготавливаются с использованием твердых сплавов.

В текстильной промышленности находят все более широкое применение направляющие кольца из твердых сплавов для нитей из натурального или искусственного шелка. Аналогичные направляющие кольца применяют при изготовлении проволочной сетки, перематке проволоки, намотке катушек, направляющих буксировочных тросов самолетов.

В керамической промышленности и порошковой металлургии твердые сплавы широко используют в качестве износостойкого материала для изготовления и армирования деталей размольного и прессового оборудования (футеровка мельниц, пресс-инструмент).

**Сверхтвердые материалы.** К сверхтвердым относят материалы, твердость которых превышает 45 ГПа: алмазы, кубический и вюрцитный нитрид бора, карбид бора и материалы на их основе.

Синтетические сверхтвердые поликристаллические материалы (СТП) представляют особую группу материалов, эффективно используемых в различных отраслях народного хозяйства. Первоначально

СТП наиболее широко использовались в инструментальном производстве, но в настоящее время применяют и как конструкционный материал.

В зависимости от исходного сырья все СТП можно разделить на три большие группы. К первой относятся материалы на основе алмаза, ко второй – на основе кубического нитрида бора, а третью составляют композиционные материалы, содержащие как алмаз, так и твердые нитриды бора, карбиды, твердые оксиды.

*Алмазный инструмент* используют для заточки, шлифования и доводки твердосплавного инструмента (металлорежущего, для обработки древесины и ее заменителей, применяемого в горнорудной промышленности и различных отраслях производства); заточки и доводки различного хирургического инструмента; обработки изделий из твердого сплава различного целевого назначения; обработки часовых, приборных и ювелирных камней из синтетических рубина, сапфира, природных агата и яшмы, самоцветов и янтаря; обработки кристаллов природных алмазов при изготовлении из них бриллиантов и инструмента; доводочного шлифования стальных и чугунных изделий; изготовления твердосплавных и стальных шлифов для металлографических исследований.

Алмазный порошок и связка образуют композиционный материал, который в виде алмазонасного слоя является рабочей частью инструмента. Алмазонасный слой определяет работоспособность и срок службы инструмента и характеризуется маркой и зернистостью алмазного порошка, маркой связки, твердостью, концентрацией алмазов, формой и размерами. Такой слой, как правило, прочно соединен с корпусом инструмента, наличие которого принципиально отличает алмазный абразивный инструмент от других типов абразивного инструмента. Материал корпуса и метод соединения с ним алмазонасного слоя выбирают в зависимости от марки связки, формы, размеров и назначения инструмента.

Разработано множество марок сверхтвердых материалов на основе нитрида бора, различающихся составом, технологией получения и областями применения. Поликристаллические материалы на основе нитрида бора могут содержать одну кубическую кристаллическую модификацию (эльбор, кубонит, кибор). Разработаны также материалы, содержащие как сфалеритоподобную, так и вюрцитоподобную модификации нитрида бора (гексанит-Р).

Изделия из СТП представляют собой пластины различной формы и специальные цилиндрические вставки массой от  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $5 \cdot 10^{-4}$  кг,

применяющиеся для производства металлорежущего инструмента (резцов, сверл, фрез), используемого при обработке закаленных сталей и чугунов с твердостью более 40 HRC. Стойкость инструмента из СТП при обработке таких материалов более чем в 10 раз превышает стойкость твердых сплавов, что обеспечивает повышение производительности обработки в 2–4 раза.

### ***Пористые порошковые материалы***

Одной из особенностей порошковых материалов является то, что технологии порошковой металлургии определяют наличие пор в структуре материала. Поры присутствуют во всех изделиях порошковой металлургии. Размеры пор, их форма, распределение в самом материале определяют механические, физические и эксплуатационные свойства материала. Современные технологии дают возможность в порошковых металлах изменять содержание пор от 0 до 70 % и таким образом позволяют получать как беспористые или низкопористые изделия, так и высокопористые материалы и изделия из них.

Работоспособность и области применения пористых порошковых материалов (ППМ) определяются наличием взаимосвязанной системы пор. Эта поровая структура обеспечивает такие свойства ППМ, как проницаемость для газов или жидкостей, фильтрующую способность, способность к капиллярному транспорту жидкости и ее удержанию в порах, развитую удельную поверхность и др. ППМ успешно используются в космической технике, в машино- и приборостроении, радиоэлектронной и химической промышленности, атомной энергетике, медицине, сельском хозяйстве и т. д. По сравнению с существующими проницаемыми материалами на органической (войлок, бумага, ткань, полимер) и неорганической (керамика, асбест, стекло) основе ППМ характеризуются большой проницаемостью, прочностью, пластичностью, устойчивостью к тепловым ударам. Они коррозионностойки и жаропрочны, могут работать при температурах  $> 1000$  °С. ППМ просты и экономичны в изготовлении, их можно многократно использовать.

Согласно разработанной классификации области применения ППМ можно разделить на три группы: фильтрующие (фильтры, фазоразделители, распределители газовых и жидкостных потоков, глушители звуковых и механических колебаний, огнепреградители и др.), капиллярно-пористые (испарители, конденсаторы, капил-

лярные структуры тепловых труб, капиллярные насосы и т. п.) и материалы со специальными свойствами (пористые аноды, пластины аккумуляторных батарей, заменители костной ткани, катализаторы, каталитично-диффузионные мембраны и т. д.).

***Фильтрующие ППМ.*** Наиболее широкое распространение получили ППМ для фильтров, назначение которых сводится к отделению газов и жидкостей от посторонних примесей.

Фильтры из ППМ используются для очистки воды, щелочных, кислотных и соленых растворов, топлива и смазочных материалов, молока, смол, основ для лаков, расплавов солей и полимеров, фильтрации сжиженных и сжатых газов (азот, кислород, гелий, воздух и др.) при их производстве и практическом применении, отходящих газов в технологических циклах химического, металлургического, цементного и других производств.

В ряде случаев с их помощью можно улавливать дорогостоящие пылевидные катализаторы, используемые в технологических процессах химического и нефтехимического производств, что позволяет значительно удешевлять процесс. В зависимости от области применения, эксплуатационных и конструктивных требований фильтры могут быть изготовлены в виде дисков, пластин, цилиндров, стаканов, конусов и др.

ППМ устойчивы к резким температурным колебаниям (тепловым ударам), а своей технологичностью в изготовлении (обработка на металлорежущих станках, склеивание, сварка, пайка и др.), они превосходят все известные в настоящее время проницаемые материалы.

Фильтры из ППМ могут изготавливаться практически любых форм и размеров.

Соответствующим выбором подходящего материала можно обеспечить высокую коррозионную стойкость, термическую стойкость, износостойкость. Фильтрующие ППМ хорошо зарекомендовали себя в газораспределителях (например, при пневмотранспорте сыпучих сред). В этом случае транспортируемый продукт (цемент, мука, удобрение, пылеобразное топливо) поступает на пористую пластину, через которую снизу подается воздух. Образующаяся при этом газопылевая смесь перемещается по транспортному трубопроводу. В этом случае материалы, изготовленные с применением ППМ, успешно заменяют ленточные и шнековые транспортеры. Опыт, накопленный при их эксплуатации на цементных заводах, показал большие преимущества ППМ, состоящие в отсутствии движущихся и изнашивающихся деталей, низкой энергоемкости, бесшумности и надежности в эксплуатации.

Они являются экологически чистыми, так как устраняется возможность выброса дисперсных частиц в атмосферу.

Газораспределители на основе ППМ успешно используются в разгрузочных устройствах при разгрузке вагонов, контейнеров и т. п., содержащих дисперсные материалы, где они являются просто незаменимыми и надежными в эксплуатации. Схема такого устройства показана на рис. 7.

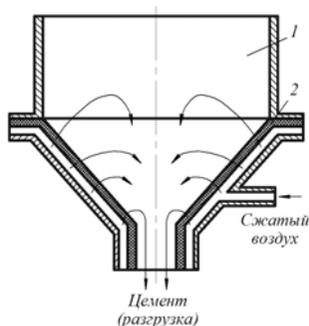


Рис. 7. Схема разгрузочного устройства:

1 – контейнер; 2 – газораспределительная перегородка из ППМ

Широкое применение ПФМ находят для аэрации жидких сред, обеспечивающей их перемешивание и насыщение газами. В этом случае газ подается через пористую стенку, находящуюся в непосредственном соприкосновении с жидкостью. Газовые пузырьки, выходящие из стенки, вступают в контакт с жидкостью и, благодаря развитой поверхности взаимодействия фаз газ–жидкость, интенсифицирует процесс газонасыщения. Использование для этих целей ППМ позволяет значительно сократить количество потребляемого воздуха, необходимого для насыщения воды кислородом, затрачиваемой электроэнергии, и время, необходимое для биохимического процесса.

Аэрация направлена на насыщение жидких сред кислородом воздуха, необходимого для обеспечения жизнедеятельности аэробных микроорганизмов, обеспечивающих биологическую очистку хозяйственно-бытовых и промышленных стоков, микробиологический синтез биологически активных веществ, необходимых, например, при производстве ферментов, в дальнейшем используемых в биохимических процессах расщепления молекул крахмала для

производства спирта. Наиболее широкое распространение на практике получили пневматические методы аэрации, основанные на дроблении потока газа на мелкие пузырьки при помощи помещаемых в обрабатываемую жидкость пористых аэраторов. Пористые аэраторы различных конструкций изготавливаются из различных проницаемых материалов в виде перфорированных или пористых листов и труб, из тканей, полимерных и керамических материалов. Однако ППМ по коррозионной стойкости, длительной прочности, регенерируемости и эффективности применения превосходят другие виды материалов по всем показателям. Аэраторы из ППМ выпускаются преимущественно двух видов: трубчатые и дисковые. Их изготавливают из порошков титана, коррозионно-стойкой стали и бронзы. Схема дискового аэратора представлена на рис. 8.

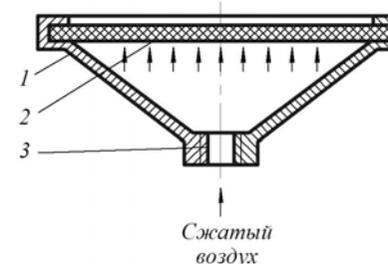


Рис. 8. Дисковый аэратор:

1 – корпус; 2 – пористый диск; 3 – штуцер

Фильтрующие ППМ применяются для защиты объектов от теплового воздействия путем пропускания через них охладителя (газа или жидкости) на защищаемую поверхность и создания на ней зоны с пониженной температурой. Такое охлаждение получило развитие в авиационной, космической и ядерной технике (например, для защиты камер сгорания и стенок реактивных двигателей, космических аппаратов, возвращающихся на Землю, стенок МГД-генераторов, электродуговых нагревателей газов и др.). Перспективными для этой цели являются псевдосплавы W–Cu, Mo–Cu. Каркас из тугоплавкого компонента позволяет сохранять требуемые прочностные свойства при высоких температурах. Медь улучшает пластичность и обрабатываемость материала и повышает его теплопроводность. Подобным способом осуществляется охлаждение свежесформованных синтетических нитей в химической промышленности (рис. 9).

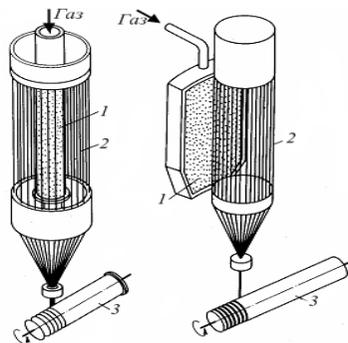


Рис. 9. Конструктивные варианты охлаждения с помощью ППМ в технологии получения синтетических волокон с трубчатым (а) и пластинчатым элементами (б):  
1 – пористый элемент; 2 – нити; 3 – катушка

На практике используется и нагрев с помощью ППМ (например, для борьбы с обледенением самолетов). В этом случае подогретый воздух подается через пористые пластины, расположенные на передних кромках крыльев или хвостового оперения самолета.

В химической, нефтеперерабатывающей и газовой промышленности широко применяются процессы контактирования газа с твердыми дисперсными материалами в кипящем или псевдооживленном слое. Кипящий слой (КС) образуется при прохождении газового потока между частицами катализатора со скоростью, достаточной для перевода их во взвешенное состояние и создания интенсивного турбулентного движения, напоминающего кипение жидкости. Равномерность выхода газа по поверхности ППМ и дает возможность осуществить этот процесс. Процессы в КС используются также для газификации и сжигания мелкодисперсного топлива, каталитического крекинга нефти, в ряде производств органического синтеза (получение спирта, каучука, хлористого винила и др.).

Принцип создания подъемной силы выходящими из ППМ потоками жидкости или газа используется в аэро- или гидростатических подшипниках, где отсутствует соприкосновение поверхностей.

На рис. 10 показана схема работы подшипника на воздушной подушке. Чистота воздуха, создающего воздушную подушку, обеспечивается четырьмя фильтрами из коррозионно-стойкой стали ПРХ18Н10. Такие подшипники применяются в вычислительных устройствах и приборах.

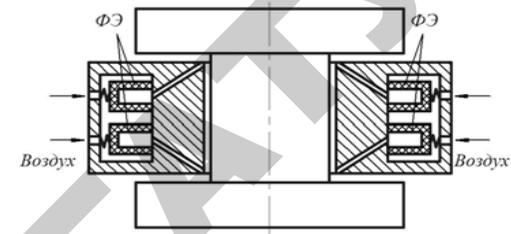


Рис. 10. Схема работы подшипника на воздушной подушке

ППМ успешно применяются в смесителях для получения газожидкостных смесей (рис. 11). Такие смесители используются в жидкостных ракетных двигателях для насыщения компонентов топлива газами перед впрыском их в камеру сгорания.

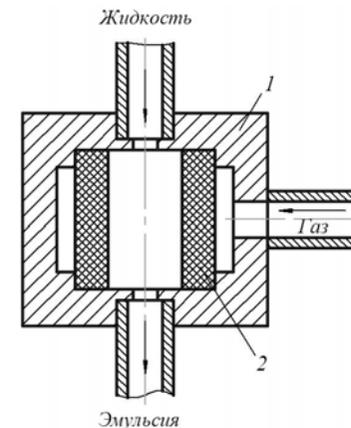


Рис. 11. Схема смесителя:  
1 – корпус; 2 – пористый элемент

Широкое применение находят фильтрующие ППМ, работающие в явно выраженном нестационарном режиме фильтрации – в огнепреградителях и активных глушителях шума. Огнепреградители применяются для локализации распространения ацетилен кислородного и водородно-кислородного пламени в автогенной технике, в газоанализаторах, детонационных установках при нанесении защитных покрытий, при изготовлении электрооборудования во взрывозащитном исполнении. Огнепреградители изготавливают из

порошков титана, коррозионно-стойкой стали, никеля и бронзы в виде труб, стаканов и дисков. Как правило, их устанавливают на выходе из баллонных и рамповых редукторов, а также на входе в газовые горелки. Наибольшее распространение получили глушители, изготовленные из различных порошков бронзы.

**Капиллярно-пористые ППМ.** Сфера применения капиллярно-пористых ППМ в современной технике расширяется в связи с интенсификацией процессов тепло- и массообмена в различных машинах и аппаратах.

Одним из наиболее эффективных способов охлаждения (нагрева) является осуществление испарительно-конденсационного цикла внутри замкнутого пространства, реализуемого в тепловых трубах (рис. 12).

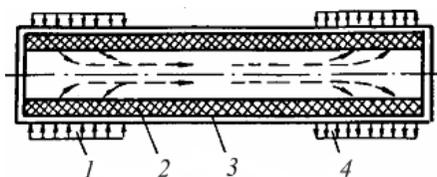


Рис. 12. Схема тепловой трубы:

1 – испаритель; 2 – капиллярная структура; 3 – корпус; 4 – конденсатор

Такая труба состоит из замкнутого герметичного корпуса, из которого удален неконденсирующийся газ. На внутренней поверхности корпуса расположена капиллярно-пористая структура, насыщенная жидким теплоносителем. Тепловая труба работает следующим образом. Подводимая теплота передается за счет теплопроводности стенки капиллярно-пористой структуре, через которую посредством теплопроводности или конвекции – к поверхности раздела жидкость–пар, где происходит процесс испарения. Пар переходит в охлаждаемую часть трубы, где за счет переохлаждения происходит его конденсация на поверхности раздела. Образовавшийся конденсат под действием капиллярных сил возвращается по капиллярно-пористой структуре в зону испарения. Вследствие того, что в такой системе происходит передача скрытой теплоты парообразования, тепловые трубы могут передавать большие тепловые потоки, причем из-за малых градиентов давления пара температурные перепады между испарителем и конденсатором невелики. Эффективная теплопроводность тепловой трубы на несколько порядков выше

аналогичного параметра одного из лучших проводников теплоты – серебра. Наряду с высокой эффективностью теплопередачи тепловые трубы обладают также и другими преимуществами: отсутствует необходимость в механических элементах и дополнительной энергии, высока их надежность и экономичность при относительной простоте изготовления и эксплуатации. Удачное сочетание этих свойств позволило тепловым трубам занять в настоящее время, лидирующее положение в теплотехнике.

Теплоотводы на основе тепловых труб применяются для охлаждения силовых полупроводниковых приборов таблеточного исполнения в серийно выпускаемых агрегатах бесперебойного питания, поставляемых на атомные электростанции, устройствах питания приводов, применяемых на горно-обогатительных комбинатах, в установках питания электроцепей и др. При этом уменьшаются габаритные размеры охлаждающего устройства на 15 % и его масса на 30 %. При одинаковой тепловой нагрузке охлаждаемых силовых полупроводниковых приборов упрощается конструкция преобразовательных устройств и снижаются расходы на их изготовление.

Известно применение тепловых труб в качестве элементов теплообменника типа «воздух–воздух» для охлаждения высоковольтных силовых шкафов. Теплообменник, который крепится к задней стенке силового шкафа (рис. 13), состоит из трубной доски с 39 тепловыми трубами, расположенными в шахматном порядке в 13 рядах, горячего *Б* и холодного *А* контуров, герметично закрытых крышкой кожуха.

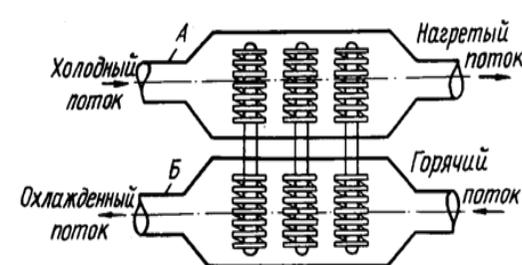


Рис. 13. Схема теплообменника типа «воздух–воздух»

Работает теплообменник следующим образом. Горячий воздух из шкафа подается в контур *Б*, проходя через который он остывает до определенной температуры и снова попадает в шкаф. Холодный воздух из окружающей среды подается в контур *А*, проходя через

который отбирает теплоту от тепловых труб и выбрасывается в окружающую среду. При этом среднеобъемный перегрев в шкафу в зависимости от отводимой мощности уменьшается на 15–28 % по сравнению с применяемыми пластинчатыми теплообменниками.

Перспективным в плане охлаждения и термостабилизации модулей электронной аппаратуры является применение плоских тепловых труб.

В этом аспекте экономия энергии за счет более эффективного использования вторичного сырья в последние годы приобретает все большее значение. Тепловые трубы находят применение в утилизации теплоты дымовых газов зерносушилок и теплогенераторов. Так, теплообменник размером 400×1500×2000 мм, содержащий 200 тепловых труб длиной 2000 мм, позволяет утилизировать теплоту агента сушки рециркуляционных зерносушилок мощностью 50 кВт, предназначенных для сушки зерна, масла, семян и др. сыпучих материалов в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Теплообменник позволяет утилизировать выбрасываемый в атмосферу через выхлопные окна осадочных камер и циклонов отработанный теплоноситель, имеющий достаточно большое теплоемкость (50–70 °С) вследствие его высокой влажности. При этом достигается снижение расхода топлива на 25,6 %, а влагосодержания отработанного агента сушки в 2–3 раза.

При утилизации теплоты дымовых газов бытовых отопительных котлов с помощью теплообменника из 18 тепловых труб длиной 360 мм достигнута экономия топлива более 10 %.

Тепловые трубы также применяются в электрических машинах для охлаждения роторов и статоров двигателей, генераторов, а также обмоток трансформаторов, в сварочной технике для охлаждения электродов, высоковольтных выключателей большой мощности, для охлаждения форм для литья пластмасс, при штамповке стеклянной и пластмассовой посуды, отливке алюминиевых деталей.

Одним из наиболее эффективных способов охлаждения высокотемпературных узлов и механизмов является испарительное охлаждение. Оно предполагает подачу жидкости в зону охлаждения под действием капиллярных сил. Доказано, что охлаждение испарением более эффективно, чем конвективное или пленочное охлаждение в равнозначных системах. Испарительное охлаждение в пористых теплообменниках является надежным средством теплового регулирования элементов топливных систем двигателей, предотвращающим перегрев топливных баков. При этом в качестве

испаряющейся жидкости может использоваться как специальная жидкость, так и криогенное топливо.

Применение ППМ в качестве испарителей в карбюраторах двигателей внутреннего сгорания способствует интенсификации испарения топлива, лучшей гомогенизации его смеси с воздухом. В результате этого достигается экономия топлива (8–14 %), сохраняются динамические качества автомобилей, на 30–50 % снижается содержание оксида углерода в выхлопных газах.

Пористые испарители выгодно отличаются от других конструкций теплообменных аппаратов тем, что не имеют подвижных частей, обладают высокой производительностью, долговечностью, имеют небольшую массу, легко восстанавливаются после длительной эксплуатации. Общий принцип действия испарителей, используемых, например, для охлаждения потока горячего газа (рис. 14), состоит в следующем. Нижняя часть пористых пластин, расположенных вертикально, опущена в резервуар с испаряющейся жидкостью, а верхняя их часть омывается потоком горячего газа. Уровень жидкости в резервуаре поддерживается автоматически.

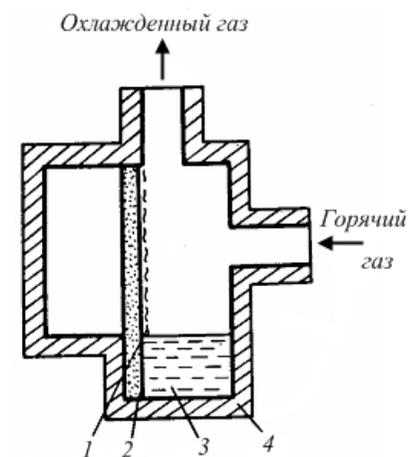


Рис. 14. Испаритель для охлаждения потока горячего газа:  
1 – пар; 2 – пористая пластина; 3 – жидкость; 4 – корпус

Принцип испарительного охлаждения используется в устройствах (рис. 15), предназначенных для перевода жидкости в парообразное состояние.

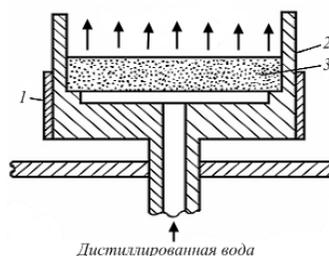


Рис. 15. Устройство для получения паров жидкости:  
1 – электронагреватель; 2 – медный блок; 3 – ППМ

Способность ППМ впитывать в поровые каналы жидкость и длительно удерживать ее за счет действия капиллярных сил используется при изготовлении пористых самосмазывающихся подшипников, которые удерживают столько смазочного материала, что его иногда достаточно для многолетней нормальной эксплуатации. Аналогичный принцип используется в производстве ювелирных изделий из пористых материалов, пропитанных парфюмерными жидкостями и способных длительное время сохранять приятный запах. Из капиллярно-пористых материалов изготавливают паяльники для пайки и демонтажа радиоэлектронной аппаратуры.

**ППМ со специальными свойствами.** ППМ широко применяются в прикладной химии в качестве пористых электродов, химических источников тока. Примером могут служить пористые электроды никель-кадмиевых аккумуляторов, никелевые пористые пластины для создания щелочных батарей. Большой интерес представляет использование пористых электродов в электрохимических генераторах (топливных элементов) при преобразовании химической энергии топлива непосредственно в электрическую.

Пористые материалы находят применение в медицине. Они используются в качестве хирургического материала для замены костной ткани. Как правило, эти элементы с размерами пор 10–500 мкм изготавливают из порошков титана или коррозионно-стойкой стали. Наличие разветвленной сети поровых каналов в таких ППМ способствует проникновению в поры костной ткани и их вживлению в организм человека. Одним из наиболее перспективных способов зубного протезирования является в настоящее время использование зубных имплантатов, вживляемых в костную ткань челюсти. Для их фиксации и крепления необходимо применение

материалов, обеспечивающих хорошую биологическую совместимость с клетками живой ткани и высокую коррозионную стойкость.

ППМ из порошков алюминия, ниобия и тантала используются в качестве анодов объемнопористых электрических конденсаторов.

Существует ряд приборов и устройств, периодически работающих под водой или под воздействием водяных струй. При их эксплуатации выделяются газы, накопление которых может привести к недопустимому повышению давления в корпусе сооружения, вплоть до его деформации и разрушения. Предотвратить попадание воды в работающие приборы и одновременно обеспечить отвод накопленных газов можно с использованием пористых полупроницаемых мембран, которые не пропускают воду до определенного давления и вместе с тем обеспечивают достаточную газопроницаемость. Такие материалы могут найти также применение в лампах для уличного освещения с повышенной водо- и пылезащитой для очистки газов от влаги и т. п.

В ряде технологий, называемых чистыми (производство интегральных схем, физико-химическая поверхностная обработка металлов, химико-фармацевтическая и др.), требуют применения в качестве защитной среды водорода с содержанием кислорода  $\leq 10^{-4}$  % (объемн.). Такие сверхчистые газы можно получить с использованием двухслойных мембран, состоящих из проницаемой медной основы и нанесенного плотного слоя палладия. Однако в ряде технологий (например, при производстве интегральных схем, выращивания кристаллов и т. д.) присутствие микрочастиц меди и даже ее ионов нежелательно. В этом случае в качестве подложки используют ППМ из порошков коррозионно-стойкой стали, на которую наносят и припекают слой смеси порошков палладия и 15 % кобальта (по массе). Такие двухслойные мембраны успешно используют для диффузионно-каталитической очистки водорода от кислорода, при этом остаточное содержание кислорода отвечает требованиям сверхчистых технологий.

ППМ в виду развитой поверхности и возможности получения материала с большим количеством несовершенств в кристаллической структуре находят все более широкое применение при реализации каталитических процессов (например, получении азотно-водородной смеси каталитическим разложением аммиака).

Производство ППМ постоянно увеличивается в связи с совершенствованием технологий получения этих материалов и расширением областей их применения.

## Порядок проведения лабораторной работы

### *Особенности исследования строения материалов, получаемых методами порошковой металлургии*

Изделия из порошков отличаются от обычных материалов, прежде всего, наличием пор. Именно пористость в сочетании с особенностями контакта металлических частиц между собой определяет специфические свойства порошковых материалов. Для налаживания контроля технологического процесса изготовления таких материалов используют макроанализ – визуальный контроль изломов. При этом по излому определяют размер частиц порошка, раковины, расслоения, судят о равномерности спекания и однородности строения изделий по сечению, о наличии оплавления, окисления и обезуглероживания.

Однако во многих случаях макроанализ не позволяет получить исчерпывающую информацию о строении и структуре порошковых материалов. Тогда прибегают к более тонкому методу – изучению микроструктуры. Микроструктура порошковых материалов, как и литых металлов и сплавов, может быть однофазной или представлять собой смесь двух или более фаз. Особенностью микроструктуры может быть наличие специальных неметаллических включений (графит, асбест и др.), а также пор.

Изучение микроструктуры спеченных материалов осуществляется с помощью оптических или электронных микроскопов. Приготовление шлифов для этой цели производят методами, известными из металлографии. Несколько отличается приготовление шлифов из твердых сплавов и пористых материалов. При приготовлении шлифов из твердых сплавов шлифовка производится на чугунном диске, на который наносят смоченный в керосине порошок карбида бора (т. е. без использования наждачной бумаги). При приготовлении шлифов из пористых металлов самой первой операцией является пропитка пор образцов эпоксидной смолой.

При металлографическом анализе устанавливаются размеры и форма частиц порошка, фазовый состав, наличие пор и неметаллических включений, их размер и характер распределения.

### *Оборудование, инструмент и материалы:*

1. Оборудование, инструменты, материалы: металлографический микроскоп МИМ-7, шлифовально-полировальный станок, травильный раствор, набор микрошлифов.
2. Плакаты, стенды: образцы порошков, полученных различными методами; детали и материалы, полученные методами порошковой металлургии.

### *Последовательность выполнения работы*

Для проведения экспериментальных исследований, заключающихся в исследовании микроструктуры материалов, получаемых методами порошковой металлургии, студентам предоставляется набор микрошлифов. Набор включает образцы следующих материалов: фильтры из порошков коррозионно-стойкой стали 10X18H10T и бронзы марки БрОФ 10-1, фрикционные материалы на медной и железной основе, конструкционные материалы на железной основе и на основе меди, твердые режущие сплавы.

Шлифы предварительно подготовленные и протравленные.

На микроскопе МИМ-7 при увеличении в 240 раз рассматриваются микроструктуры представленных микрошлифов. При проведении микроструктурных исследований студенты обращают внимание на взаимное расположение частиц порошка, наличие пор и неметаллических включений (графита, оксидов, карбидов).

На рис. 16 в качестве примера представлена микроструктура материала фильтра из порошка бронзы марки БрОФ 10-1, а на рис. 17 – соответственно микроструктура антифрикционного материала из порошков железа и графита.

Необходимо зарисовать схемы микроструктур, анализируемых материалов и описать их свойства и применение.

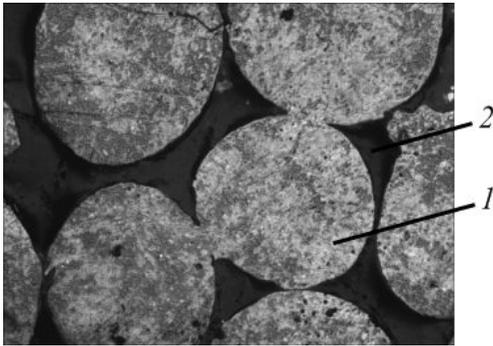


Рис. 16. Микроструктура материала ( $\times 240$ ) фильтра:  
1 – частицы порошка; 2 – поры

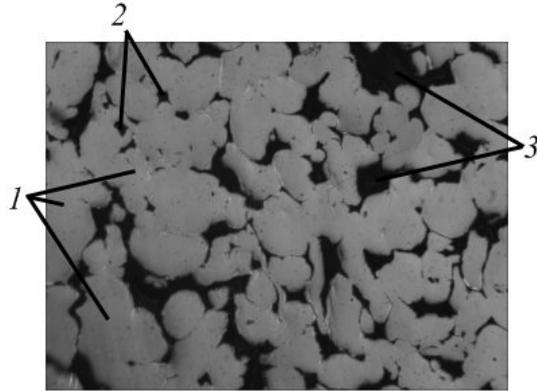


Рис. 17. Микроструктура антифрикционного материала ( $\times 240$ ):  
1 – частицы порошка; 2 – межчастичные; 3 – внутрочастичные поры

#### Содержание отчета:

1. Цель работы.
2. Общие сведения технологии получения материалов методами порошковой металлургии.
3. Сведения об основных областях применения материалов, получаемых методом порошковой металлургии.
4. Схематическое изображение рассмотренных микроструктур порошковых материалов, их анализ, свойства и применение.
5. Выводы.

#### Контрольные вопросы:

1. Что такое порошковая металлургия?
2. Что такое порошковые материалы?
3. Что такое порошки?
4. Типовая технологическая схема получения порошковых материалов.
5. Механические методы получения порошков.
6. Что такое формование порошков
7. Какие методы формования вы знаете? Что такое спекание?
8. Особенности спекания порошковых материалов.
9. Основные области применения порошковых материалов.
10. Антифрикционные материалы, технология их изготовления и свойства.
11. Фильтрующие материалы, технология их изготовления и свойства.
12. Фрикционные материалы, технология их изготовления и свойства.
13. Электротехнические материалы, технология их изготовления и свойства.
14. Технология изготовления и свойства конструкционных материалов.
15. Твердые сплавы.
16. Отличительные особенности микроструктуры порошковых материалов от литых материалов.

#### Литература

1. Новые материалы и технологии : пособие / В. М. Капцевич, В. Р. Калиновский, В. К. Корнеева. Минск : БГАТУ, 2010. 284 с.
2. Капцевич В. М. Новые материалы: технологии изготовления и области применения / В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, Д. И. Кривальцевич. Минск : БГАТУ, 2010. 232 с.
3. Порошковая металлургия и напыленные покрытия : учебник для вузов / Б. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин [и др.]. М. : Металлургия, 1987. 792 с.
4. Андриевский Р. А. Введение в порошковую металлургию. Фрунзе : МИМ, 1988. 174 с.
5. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы / под ред. В. Шатта : пер. с нем. под ред. Р. А. Андриевского. М. : Металлургия, 1983. 620 с.

6. Порошковая металлургия сталей и сплавов / Ж. И. Дзюладзе, Р. П. Щеголева, Л. С. Голубева [и др.]. М. : Металлургия, 1978. 264 с.

7. Злобин Г. П. Формирование изделий из порошков твердых сплавов. М. : Металлургия, 1980. 224 с.

8. Витязь П. А. Пористые порошковые материалы и изделия из них / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, В. К. Шелег. Минск : Высшейшая школа, 1987. 164 с.

9. Формирование структуры и свойств пористых порошковых материалов / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, А. Г. Косторнов [и др.]. М. : Металлургия, 1993. 240 с.

## Лабораторная работа 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ

*Цель работы:* ознакомиться с основными свойствами порошков, используемых для получения деталей методами порошковой металлургии, и освоить методику определения некоторых свойств.

*Студент должен знать:* основные свойства порошков, используемых для получения деталей методами порошковой металлургии; их влияние на порошковые материалы и эксплуатационные характеристики изготовленных из этих материалов деталей; методы определения некоторых свойств порошков;

*уметь:* определять гранулометрический состав, текучесть, насыпную плотность.

#### Общие сведения

*Свойства порошков* – совокупность свойств, характеризующих материал в порошкообразном состоянии. К ним относятся гранулометрический состав, насыпная плотность, пикнометрическая плотность, плотность после утряски, текучесть, удельная поверхность, форма частиц, формуемость, токсичность и др. Свойства исходных порошков, состав и свойства шихты, режимы спекания, являются факторами, определяющими свойства порошковых материалов и изделий из них. Свойства порошков во многом зависят от способов их получения. Поэтому основные характеристики порошков, используемых в промышленности, описываются соответствующими стандартами и техническими условиями, оговаривающими их свойства. Свойства металлических порошков условно можно подразделить на химические, физические, физико-химические и технологические. Такое деление достаточно условно, например, реакционная способность в кислоте (химическое свойство) можно отнести к технологическим свойствам при разработке технологии травления в кислоте.

*Химические свойства* порошков определяются составом порошков. Химический состав обусловлен содержанием основного элемента, легирующих компонентов, примесей, возможных механических загрязнений и газов, устанавливается стандартами, техниче-

скими условиями или подбирается в соответствии с требованиями, предъявляемыми к изделиям.

*Физические свойства* – свойства, обусловленные физическими явлениями и процессами, происходящими в веществе, а также его физической природой. К ним относятся: размер частиц, гранулометрический состав, пикнометрическая плотность, удельная поверхность, форма частиц, микротвердость и др. Они, как правило, указываются в стандартах и технических условиях на порошки.

Размеры частиц порошков, в зависимости от метода получения, могут колебаться от долей микрометра до миллиметра. Порошки классифицируются по размеру частиц: наноразмерные (размер частиц менее 0,1 мкм); ультратонкие (размер частиц от 0,1 до 0,5 мкм); весьма тонкие (от 0,5 до 10 мкм); тонкие (от 10 до 40 мкм); средней тонкости (от 40 до 150 мкм) и крупные (свыше 150 мкм). От размера частиц порошков в сочетании с другими свойствами зависит насыпная плотность, давление прессования, усадка при спекании и механические свойства готовых изделий.

Гранулометрический (фракционный) состав представляет собой соотношение количества частиц разных размеров (фракций), выраженное в процентах (как правило, по массе). Гранулометрический состав всегда приводится в нормативной документации на порошки. От гранулометрического состава зависят структурные и эксплуатационные характеристики порошковых материалов.

Форма частиц зависит от химического состава металла и способа получения порошка и может быть сферической (распыленные и карбонильные), губчатой (восстановленные), дендритной (электролитические), осколочной (при размоле в мельницах), чешуйчатой (при электролизе), игольчатой (при экстракции из расплава, конденсации из паровой фазы). Удельная поверхность представляет собой суммарную поверхность всех частиц порошка в единице объема или массы. Для металлических порошков колеблется в пределах от 0,01 м<sup>2</sup>/г до нескольких квадратных метров на грамм. Удельная поверхность зависит от размера и формы частиц, степени развитости их поверхности. Удельная поверхность влияет на содержание адсорбированных газов в порошке, стойкость к окислению, а также активность процессов, протекающих при прессовании и, особенно, при спекании.

Пикнометрическая плотность характеризует истинную плотность частиц порошка и зависит от совершенства внутренней макро- и микроструктуры частиц, наличия пор, оксидов, нитридов

и т. д. Для сплавов пикнометрическая плотность порошка зависит и от распределения в нем легирующих элементов и фаз.

Микротвердость порошков позволяет косвенно оценить их способность к деформированию, то есть их уплотняемость (формуемость и прессуемость), а также необходимую величину давления прессования. Микротвердость зависит от содержания в основном металле различных примесей и легирующих элементов, искажений кристаллической решетки.

Физико-химические свойства – условный термин, объединяющий ряд физических свойств и химических свойств вещества (материала) в их совокупности. К физико-химическим свойствам относятся каталитическая активность, поверхностное натяжение, растворимость, реакционная способность, термодинамические свойства, электрохимические свойства и др.

Технологические свойства – свойства материала, характеризующие его обрабатываемость. Для порошков технологические свойства характеризуются насыпной плотностью, плотностью утряски, текучестью, уплотняемостью и др. Знание технологических свойств позволяет оценить поведение частиц порошка при их формировании, скорость засыпки в пресс-форму, рассчитать величину навески, размеры пресс-формы и т. д.

Насыпная плотность – это масса единицы объема свободно насыпанного порошка. Насыпная плотность определяется плотностью материала порошка и плотностью укладки частиц в данном объеме. Она зависит от дисперсности, формы порошка и от соотношения различных фракций частиц в порошке. Насыпная плотность является важнейшей характеристикой порошка, на основании которой рассчитываются размеры технологической оснастки (пресс-форма) для прессования, а также производится наладка пресса в случае дозирования шихты объемным методом.

Плотность укладки частиц зависит от степени заполнения мелкими частицами пустот между крупными, образования и разрушения мостиков или арок при засыпке порошка в пресс-форму, гранулометрического состава порошка, формы и коэффициента межчастичного трения частиц. Выступы и неровности на поверхности частиц затрудняют их перемещение, порошки с такими частицами обладают меньшей насыпной плотностью. Для ее увеличения порошок подвергают различным видам обработки, например, обкатке в шаровой мельнице или сфероидизирующему отжигу.

В результате такой обработки частицы порошка приобретают форму, близкую к сферической.

Плотность утряски представляет собой массу единицы объема порошка при его встряхивании или наложении вибрации. Плотность утряски по сравнению с насыпной плотностью выше на 20–25 % и зависит от тех же свойств порошка, что и насыпная плотность. Максимальная плотность утряски достигается при определенном гранулометрическом составе порошков (соотношении размеров и количества мелких и крупных частиц) и максимально плотной их укладке.

Текучесть – это способность порошка с определенной скоростью вытекать из отверстий. Текучесть определяет скорость подачи навески в пресс-форму и ее заполнение. Особенно важна текучесть при автоматическом прессовании, когда скорость заполнения пресс-формы ограничивает производительность пресса.

Уплотняемость – способность порошка изменять плотность после прессования при заданном давлении. Для определения характеристик уплотняемости строят диаграммы прессования – график зависимости плотности прессовок от давления прессования. Уплотняемость связана с прессуемостью и формуемостью порошков.

Прессуемость – это способность к обжатию в процессе прессования. Хорошая прессуемость облегчает и удешевляет процесс формования, так как требует меньшего давления, следовательно, увеличивает срок службы прессовой оснастки. Прессуемость в основном зависит от пластичности частиц порошка, то есть от количества и вида примесей в порошке.

Формуемость – способность сохранять форму после прессования. Формуемость зависит от формы частиц порошка. Порошки с развитой поверхностью дендритной формы обладают наилучшей формуемостью. Хорошая формуемость делает прессовки способными к транспортировке, что облегчает производство деталей.

Внешнее трение – механическое взаимодействие частиц порошка и компактного материала (пресс-формы), возникающее в местах их соприкосновения и препятствующее их относительному перемещению.

Межчастичное трение – механическое взаимодействие между частицами порошка, возникающее в местах их соприкосновения и препятствующее их перемещению относительно друг друга. Количественной оценкой величины внешнего и межчастичного трения являются их коэффициенты. Именно трение приводит к неравно-

мерному распределению плотности в объеме брикета из-за потери усилия прессования на его преодоление. Трение также оказывает существенное влияние на текучесть, насыпную плотность, равномерность укладки и другие характеристики порошков. Величина коэффициента трения зависит от состояния поверхности частиц их размеров и формы.

### **Определение некоторых свойств порошков**

Такие свойства порошков как гранулометрический состав, форма частиц, насыпная плотность, текучесть широко используются при отработке технологий получения изделий методами порошковой металлургии.

#### ***Гранулометрический состав***

*Размер частиц* порошков, получаемых различными методами, колеблется от долей мкм до 1 мм. Металлические порошки в зависимости от размера частиц (диаметра) классифицируются на ультратонкие (менее 0,5 мкм), весьма тонкие (от 0,5 до 10 мкм), тонкие (от 10 до 40 мкм), средней тонкости (от 40 до 150 мкм) и грубые (от 150 до 1000 мкм).

*Гранулометрический состав* – это количественное соотношение частиц разных размеров или распределение по размерам между их верхним и нижним значениями, выраженное в процентах.

На практике чаще всего гранулометрический состав порошка определяют ситовым методом на стандартных ситах и микроситах, седиментационным (фотиседиментационный, гравитационная классификация, классификация с помощью центрифуги) анализом или методом количественной металлографии на оптическом или электронном микроскопах.

Ситовый анализ основан на механическом разделении частиц по размерам под действием сил гравитации и их просеивании через ячейки сит известного размера, превышающего размеры частиц. Для интенсификации процесса отсева используется наложение ультразвуковых колебаний, вибрации, потока жидкости.

Ситовый анализ проводится по ГОСТ 18318-94 на приборе для отсева металлических порошков с использованием сит с квадратными ячейками, в мировой практике – по ИСО 4497-83.

Размеры отверстий сит стандартизованы в большинстве стран. Нижняя граница размеров ячеек тканых сит составляет 40 (20) мкм. Сита с меньшим размером ячеек (до 5 мкм) получают методом фотолитографии. Однако следует отметить, что процесс ситового анализа в диапазоне размеров ячеек и частиц, близком к 40 мкм, чрезвычайно длителен и нестабилен вследствие очень малой массы частиц. Размеры ячеек сит различных номеров приведены в таблице.

Таблица

Размеры ячеек сит различных номеров

Номер сетки	Размер стороны ячейки, мкм	Диаметр проволоки, мкм
1	1000	400
08	800	300
05	500	250
045	450	200
0315	315	160
02	050	100
016	160	80
01	100	60
0063	63	40
0050	50	40

На рис. 1 изображена схема широко используемого прибора модели 029 для механического отсева и определения зернового состава формовочных смесей.

Прибор работает следующим образом. Набор сит 2 устанавливают на столик 3, накрывают крышкой 1 и закрепляют винтами 8. На станине 5 прибора смонтирован электродвигатель 6, приводящий во вращение эксцентриковый вал 4, на котором установлен столик 3. Для встряхивания сит в вертикальном направлении по крышке 1 периодически ударяет рычаг 9. Сита в наборе установлены сверху вниз с убыванием размера ячеек. По такой же схеме построены и аналогичные зарубежные приборы.

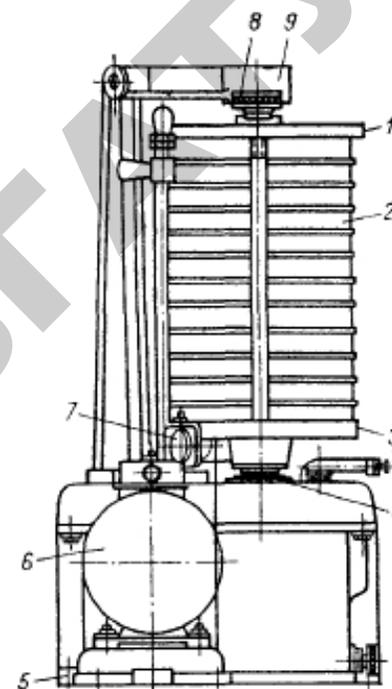


Рис. 1. Прибор модели 029 для механического отсева и определения зернового состава формовочных смесей:  
1 – крышка; 2 – набор сит; 3 – столик; 4 – эксцентриковый вал;  
5 – станина; 6 – электродвигатель; 7 – ограничитель; 8 – винты; 9 – рычаг

Для проведения анализа берется навеска не менее 100 г исследуемого порошка, помещаемая на верхнее сито. Длительность отсева составляет 30 мин. По окончании отсева набор сит разбирается и проводится взвешивание массы порошка на каждом сите. При этом измеренную массу относят к размеру частиц больше размера ячейки сита, с которого взята проба, но меньше размера ячейки верхнего сита, например, +0,063–0,1 мм. Главной проблемой, влияющей на точность ситового анализа, является удержание некоторого количества частиц сеткой (т. е. забивания сит частицами порошка).

Седиментационный анализ предназначен для определения granulometric composition металлических порошков со сферической и полиэдрической формой частиц размером от 0,5 до 40 мкм.

Анализ основан на определении скорости оседания частиц дисперсной фазы, взвешенной в вязкой жидкости. Определяя время оседания частиц в жидкости и фиксируя вес оседающей фракции, вычисляют диаметр оседающих частиц и соответственно гранулометрический состав испытываемого порошка.

На ранних этапах использования методов седиментации применялись гравиметрические методы фиксации веса выделившейся фракции. Однако в настоящее время более распространены концентрационные методы, среди которых самое широкое применение получил метод фотоседиментации, основанный на зависимости между дисперсностью суспензии и ее светопоглощением или рассеянием.

При фотоседиментационном анализе скорость оседания частиц определяют по скорости изменения оптической плотности суспензии порошка. Оптическую плотность фиксируют непрерывно или через определенные промежутки времени по фотоэлектродвижущей силе или фототоку, возникающему в фотоэлементе от светового потока, прошедшего через суспензию. Полученная в результате анализа зависимость фотоэлектродвижущей силы (фототока) от времени оседания является основанием для расчета массовой доли частиц разных размеров.

Жидкая среда должна хорошо смачивать порошок и быть химически инертной к нему, и не образовывать агломераты. Концентрация частиц в суспензии не должна превышать 0,2 об. %. В качестве жидкой среды применяют спирт (этиловый, бутиловый, изоамиловый).

Главным преимуществом данного метода является отсутствие какого-либо воздействия на исследуемый порошок, легкость автоматизации процесса измерений и обработки результатов. Как правило, современные приборы, после ввода значения пикнометрической плотности порошка, выдают в автоматическом режиме интегральную и дифференциальную кривую распределения частиц по размерам в графическом виде, рассчитывают среднее значение размеров частиц и другие стандартные характеристики.

Выполнение анализа на фотоседиментографе имеет ряд особенностей и преимуществ. Можно использовать малые навески порошка (5–10 г), т. к. желательная концентрация порошка в кювете – 0,01–0,015 % от массы дисперсионной жидкости. Высокая чувствительность, возможность полной автоматизации регистрации и обработки результатов. Тем не менее, физические особенности метода накладывают ограничение на диапазон измерений. Так, для фотоседиментографа «Analisette 20» производитель рекомендует исследовать распределение частиц в диапазоне размеров 2–200 мкм.

Существенно (на порядок) уменьшить нижний предел измерений размеров частиц позволило использование вместо светового потока для регистрации концентрации частиц в суспензии узкого пучка рентгеновского излучения. Так, в рентгеновском сканирующем седиментографе благодаря этому стало возможным исследование частиц в диапазонах размеров 0,1–300 мкм.

Микроскопический метод в соответствии с ГОСТ 23402-78 предусматривает определение размера частиц с помощью окуляра с нанесенной на него шкалой. Микроскопический метод имеет ряд преимуществ, т. к. позволяет оценивать не только размер частиц, но и форму, и структуру порошка, однако он достаточно трудоемкий и длительный по времени, поэтому применяется в основном в исследовательских целях. Методами оптической микроскопии возможно исследование частиц размером от 0,5 мкм и выше, а электронной (СЭМ, РЭМ) от 0,001 до 10 мкм.

Для получения качественных результатов анализа в исследуемых порошках должны отсутствовать агломераты. Наиболее простой метод получения препарата для металлографических исследований – помещение тонким слоем порошка на стекло. Если исходный порошок находится в агломератах, необходимо предварительно сделать суспензию, а затем растереть суспензию по стеклу.

В последние годы в связи с быстрым развитием компьютерной техники и программ по обработке изображения этот метод находит все большее применение в промышленности. В настоящее время для определения размера и формы частиц часто применяют количественный стереологический анализ.

Количественный стереологический анализ порошков проводится на автоматическом анализаторе изображения с помощью различных программ.

Термин «размер частиц» весьма условный, т. к. точно оценить диаметр можно только у частицы сферической формы. *Форма частиц* зависит от метода получения порошка и может быть сферической, округлой, губчатой, дендритной, угловатой, пластинчатой, чешуйчатой (рис. 2). Она оказывает большое влияние на технологические свойства порошков (удельную поверхность, насыпную плотность, текучесть, прессуемость и формуемость) и характеризуется фактором формы, который изменяется от 0,2 (дендритные частицы) до 1,0 (сферические).

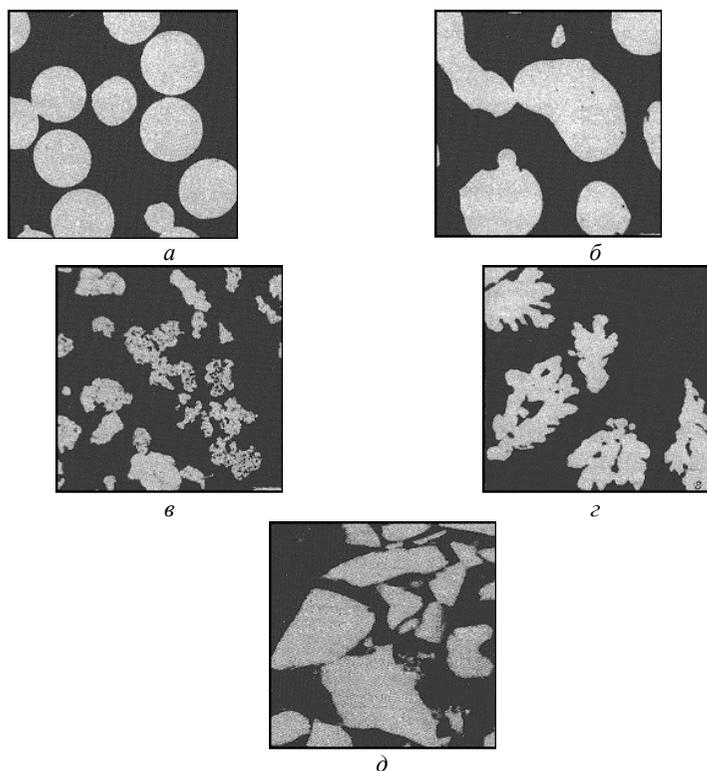


Рис. 2. Форма частиц металлических порошков:  
 а – сферическая; б – округлая; в – губчатая; г – дендритная; д – угловатая

Для количественного описания формы частиц используют безразмерные характеристики – *факторы формы*, которые сохраняют постоянную величину для частиц заданной формы, независимо от их размера. Факторы формы представляют собой отношения:

– максимального линейного размера проекции частицы ( $l_{\max}$ ) к ее минимальному размеру ( $l_{\min}$ ) –  $l_{\max}/l_{\min}$ ;

– периметра проекции частицы ( $P$ ) к площади ее проекции ( $S$ ) –  $P^2/S$ .

Фактор  $l_{\max}/l_{\min}$  используется для характеристики степени неравноосности частиц.

Фактор  $P^2/S$  применяется для сравнения форм проекций с некоторой типовой конфигурацией частицы (например, имеющих минимальное отношение  $P^2/S$ ), а также для определения развитости

поверхности частиц. Последняя оценивается сравнением с частицей некоторой усредненной формы с гладкой поверхностью, конфигурация проекции которой выбрана на основании фактора ( $l_{\max}/l_{\min}$ ).

Для проведения исследования фактора формы порошок препарируют, т. е. насыпают на гладкую поверхность, клейкую поверхность, или специально подготавливают в соответствии с методикой измерения в конкретных условиях и помещают под объектив микроскопа.

Измерение размеров частиц проводят по изображению, полученному с использованием электронного микроскопа, оптического микроскопа, проекционной приставки, фотографии.

Размеры проекций частиц в поле зрения препарата измеряют в миллиметрах, микрометрах, нанометрах

На современном оборудовании все расчеты при определении стереологических характеристик и измерении размеров частиц порошков проводятся с применением автоматизированной системы анализа автоматических анализаторов изображений. Автоматизированная система анализа изображений обеспечивает статистический анализ и построение гистограмм по любому из измеренных параметров.

*Насыпная плотность порошка* – есть масса единицы его объема при свободной насыпке. Эта характеристика определяется плотностью материала порошка, размером (формой) его частиц, плотностью укладки частиц и состоянием их поверхности. Сферические порошки с гладкой формой частиц обеспечивают более высокую насыпную плотность. Для насыпной плотности полидисперсных порошков существует оптимум гранулометрического состава, при котором обеспечивается максимальная для данного материала насыпная плотность: мелкие частицы заполняют пустоты между крупными, и их суммарный объем соответствует объему этих пустот.

Насыпную плотность определяют по ГОСТ 19440-74 на приборе, называемом волкометр (рис. 3а), который представляет собой прямоугольный канал с наклонными перегородками, по которым порошок после засыпки его через верхнюю воронку, равномерно разрыхляясь, заполняет мерную емкость с точно фиксированным объемом ( $25 \text{ см}^3$ ). Избыток порошка в этой емкости удаляют стеклянной пластинкой, после чего взвешиванием определяют массу порошка и рассчитывают насыпную плотность:

$$\gamma_{\text{нас}} = (M_2 - M_1)/V, (\text{г/см}^3),$$

где  $M_1$  – масса мерной емкости;

$M_2$  – масса мерной емкости с порошком;  
 $V$  – объем мерной емкости.

Для порошков с хорошей текучестью предусмотрена также возможность определения насыпной плотности прямой засыпкой их в мерную емкость через воронку с выходным отверстием диаметром 5 мм (рис. 3б).

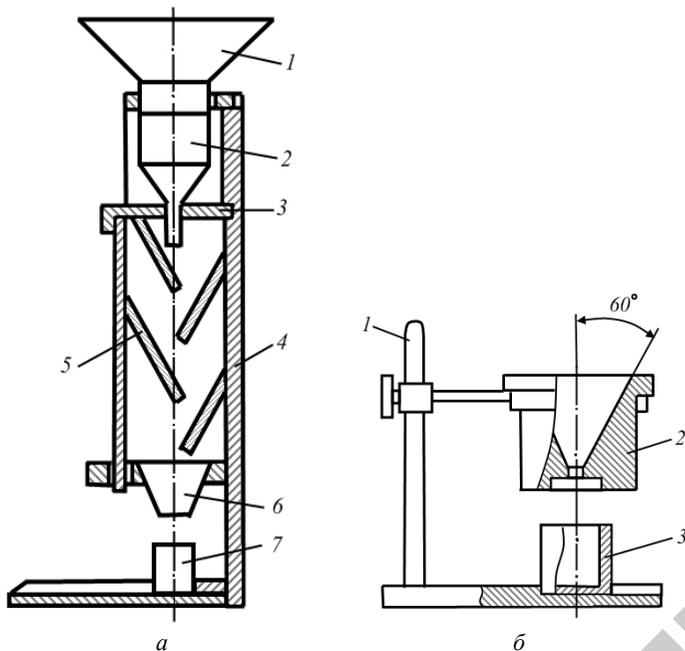


Рис. 3. Приборы для определения насыпной плотности порошков:  
 а – волюмометр (1 – приемная воронка; 2 – малая воронка;  
 3 – съемная крышка; 4 – опорная стенка корпуса; 5 – отбойные пластины;  
 б – направляющая воронка; 7 – стакан); б – воронка (1 – штатив;  
 2 – воронка; 3 – стакан)

Насыпную плотность учитывают при расчете объема полости матрицы при прессовании.

Текучесть порошка, т. е. его способность перемещаться под действием силы тяжести, оценивается по ГОСТ 20899-75 временем истечения ( $\tau$ , с) навески порошка массой 50 г через калиброванное отверстие диаметром 2,5 мм (рис. 4).

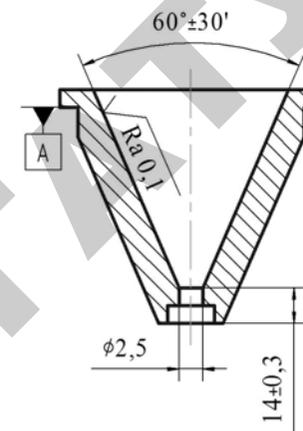


Рис. 4. Воронка для определения текучести порошка

Текучесть порошка зависит от плотности материала, гранулометрического состава, формы и состояния поверхности частиц, степени окисленности и т. д. По этой причине в ряде случаев текучесть порошка в стандартных условиях с истечением его через отверстие диаметром 2,5 мм может не реализовываться.

Текучесть порошка учитывают при определении производительности автоматических прессов, так как она определяет время заполнения порошком пресс-формы. Текучесть ухудшается при увлажнении порошка, увеличении его удельной поверхности и доли мелкой фракции. Текучесть несколько улучшается при окислении поверхности частиц.

### Порядок проведения лабораторной работы

#### Оборудование, инструмент и материалы:

1. Металлографический микроскоп ММУ-3.
2. Образцы порошков (3 наименования).
3. Прибор для отсева порошков (мод. 029) и комплект сит.
4. Волюмометр.
5. Мерная емкость.
6. Секундомер.
7. Прибор для определения текучести.
8. Лабораторные весы.

### Последовательность выполнения этапов работы:

1. Изучить основные свойства порошков.
2. Изучить методику определения гранулометрического состава методом ситового анализа и устройства прибора модели 029.
3. Подготовить навески (100 г) исследуемых порошков.
4. Высыпать первую навеску на верхнее сито 2 (рис. 1) накрыть крышкой 1 и включить установку на 30 мин.
5. После выключения установки взвешивается порошок, находящийся на каждом сите. Данные заносятся в протокол 1.
6. В соответствии с методикой описанной выше определить текучесть и насыпную плотность исследуемых порошков. Данные занести в протокол 1.
7. Поместить на предметный столик микроскопа ММУ-3 исследуемый порошок и, сравнивая с фотографиями на рис. 2, записать в протокол 1, к какому типу (сферическая, округлая, губчатая, дендритная, угловатая) относится форма частиц исследуемых порошков.
8. Составить отчет по работе.

Протокол 1 – Результаты испытания свойств металлических порошков

Марка порошка	Гранулометрический состав, %, для следующего размера фракций, мкм						Насыпная плотность $\gamma_{нас}$ , г/см <sup>3</sup>	Текучесть $\tau$ , с	Тип формы частиц
	(-315) (+250)	(+160) (-250)	(+100) (-63)	(+63) (-100)	(+50) (-63)	(-50)			
1.									
2.									
3.									
4.									

### Содержание отчета:

1. Цель работы.
2. Сведения о свойствах порошков.
3. Методика определения гранулометрического состава методом ситового анализа.
4. Методика определения текучести и насыпной плотности (схема приспособлений для их определения).
5. Таблица с результатами исследований.
6. Выводы.

### Вопросы для контроля:

1. Как классифицируются свойства порошков, используемых для получения порошковых материалов?
2. Какие химические свойства порошков учитываются при получении порошковых материалов?
3. Какие физические свойства порошков учитываются при получении порошковых материалов?
4. Какие технологические свойства порошков учитываются при получении порошковых материалов?
5. Как определяется гранулометрический состав порошков?
6. Как определяется текучесть порошков?
7. Как определяется насыпная плотность порошков?
8. Что такое фактор формы порошков?

### Литература

1. Новые материалы и технологии : пособие / В. М. Капцевич, В. Р. Калиновский, В. К. Корнеева. Минск : БГАТУ, 2010. 284 с.
2. Капцевич В. М. Новые материалы: технологии изготовления и области применения / В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, Д. И. Кривальцевич. Минск : БГАТУ, 2010. 232 с.
3. Словарь-справочник по порошковой металлургии / Е. Л. Шведков, Э. Т. Денисенко, И. П. Ковенский. Киев : Наукова думка, 1982. 270 с.
4. Порошковая металлургия и напыленные покрытия : учебник для вузов / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин [и др.]. М. : Металлургия, 1987. 792 с.
5. Роман О. В. Справочник по порошковой металлургии: порошки, материалы, процессы / О. В. Роман, И. П. Габриелов. Мн. : Беларусь, 1988. 175 с.
6. Савич В. В., Дьячкова Л. Н., Шипица Н. А. [и др.]. Спеченные порошковые материалы : методы и приборы контроля свойств исходных порошков, исследования структуры и эксплуатационных характеристик изделий из них / В. В. Савич, Л. Н. Дьячкова, Н. А. Шипица [и др.] ; под науч. ред. В. В. Савича. Минск: Тонпик, 2008. 320 с.
7. Андриевский Р. А. Введение в порошковую металлургию. Фрунзе : МИМ, 1988. 174 с.

8. ГОСТ 19440-94. Порошки металлические. Определение насыпной плотности.

9. ГОСТ 20899-98. (ИСО 4490-78) Порошки металлические. Определение текучести с помощью калиброванной воронки (прибора Холла).

10. ГОСТ 18318-94. Порошковая металлургия. Определение размера частиц сухим просеиванием.

11. ГОСТ 25849-83. Порошки металлические. Метод определения формы частиц.

Лабораторная работа 5

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВ**

*Цель работы:* ознакомиться с технологиями быстрого прототипирования на примере технологии селективного лазерного спекания порошковых материалов.

*Студент должен знать:* основные виды технологий быстрого прототипирования; особенности реализации технологии селективного лазерного спекания; основы компьютерного моделирования технологических процессов;

*уметь:* рассчитать производительность технологии селективного лазерного спекания при заданных параметрах; анализировать характер протекания процессов лазерного спекания при различных режимах.

### **Общие сведения**

Технология *селективного лазерного спекания* (*Selective Laser Sintering – SLS*) является одной из разновидностей технологий быстрого прототипирования (*Rapid Prototyping – RP*). RP-технологии имеют большую производительность и производственную гибкость, высокий уровень автоматизации и компьютеризации. Они существенно сокращают время натурного моделирования и подготовки производства новых видов изделий, позволяют производить как модели изделий, так и сами изделия с различным функциональным назначением. Форма этих изделий может иметь такую степень сложности, которую трудно, а порой и невозможно обеспечить традиционными методами формообразования. RP-технологии дают наибольший экономический эффект в условиях индивидуального и мелкосерийного производства.

Основные особенности RP-технологий сводятся к следующему. Сначала в компьютере создается геометрическая модель изделия, там же она послойно рассекается системой параллельных плоскостей. Далее эта модель воспроизводится в натуре путем последовательного формирования слоев из определенных материалов. Толщина формируемых слоев равна толщине слоев, на которые рассечена геометрическая модель, а их конфигурация соответствует

конфигурации слоев геометрической модели. Во время формирования (или после него) эти слои соединяются между собой. В результате получается монолитное изделие заданной формы.

SLS-технология обеспечивает послойное формирование изделий из порошковых материалов путем селективного спекания лучом лазера последовательно наносимых друг на друга порошковых слоев с одновременным припеканием друг к другу их спеченных участков.

Для получения SLS-изделий используются как однокомпонентные, так и двух- и многокомпонентные порошки. Обычно в качестве однокомпонентных порошков применяются порошки различных металлов или сплавов. В качестве двух- и многокомпонентных порошков используются композиции (смеси) порошков на основе металлов, керамики или стекла со связкой из термопластичных полимеров. Кроме того, в качестве связки применяются легкоплавкие металлы.

Типичная SLS-установка, схематично показанная на рис. 1, работает следующим образом. На рабочую платформу, снабженную ограничительными стенками, последовательно наносятся слои порошка определенной толщины. Каждый слой наносится с помощью бункера со щелевым отверстием, который перемещается над поверхностью платформы (над поверхностью ранее нанесенного слоя). Каждый слой селективно спекается под действием лазерного луча, перемещающегося относительно неподвижной платформы по заданной траектории в соответствии с контурами слоев геометрической модели. Перед нанесением очередного слоя платформа опускается на расстояние, равное толщине слоя. Под действием лазерного излучения спекаемые участки слоев припекаются друг к другу. В результате формируется многослойное спеченное изделие требуемой формы, которое легко отделяется от оставшегося порошка, не подвергавшегося спеканию.

К числу основных факторов, которые следует учитывать при разработке SLS-технологии, относятся:

- 1) поглощательная способность порошков, влияющая на энергетические параметры SLS-процесса;
- 2) кинетические закономерности лазерного спекания порошков, влияющие на производительность процесса изготовления SLS-изделий;
- 3) геометрические характеристики качества поверхности SLS-изделий.

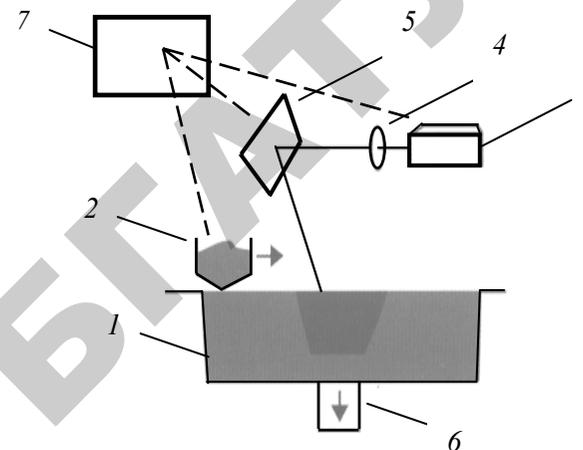


Рис. 1. Схема SLS-установки:

- 1 – платформа для формирования изделия; 2 – устройство послойной подачи порошка;  
 3 – лазер; 4 – оптическая система (фокусирующие линзы);  
 5 – устройство перемещения лазерного луча относительно платформы;  
 6 – устройство вертикального перемещения платформы;  
 7 – управляющая система

Поглощательная способность (коэффициент поглощения) порошка  $A$  зависит от длины волны лазерного излучения  $\lambda$ , химического состава материала, геометрических характеристик поверхности, химического состава окружающей среды и почти не зависит от гранулометрического состава порошка: как правило, разница в значениях  $A$  для порошков с различной зернистостью не превышает погрешности измерений (10 %).

Обычно компоненты порошковых смесей имеют различные значения  $A$ . Экспериментально установлено, что независимо от длины волны  $\lambda$  значения  $A$  двухкомпонентной порошковой смеси могут быть описаны с точностью до 10 % с помощью формулы:

$$A = A_1\gamma_1 + A_2\gamma_2, \quad (1)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – поглощательные способности компонентов;

$\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – объемные доли компонентов.

Чем больше поглощательная способность порошка, тем меньше энергетические затраты, необходимые для его лазерного спекания.

Кинетические закономерности лазерного спекания порошков проявляются в особенностях развития процесса образования контактов между спекаемыми частицами. В случае однокомпонентных порошков этот процесс имеет следующие стадии: поверхностное плавление частиц при нагреве; миграция (растекание) поверхностных слоев расплава, которые, сливаясь в приконтактной области, образуют жидкие межчастичные манжеты; затвердевание расплава при охлаждении, завершающееся формированием твердых межчастичных перешейков. Обычно образование расплава и его миграция идут параллельно и сопровождаются взаимным сближением частиц. В случае двух- и многокомпонентных порошков на начальных стадиях этого процесса связующий компонент полностью расплавляется, а образовавшийся расплав, растекаясь и смачивая твердые частицы основного компонента, образует жидкие межчастичные манжеты; затем расплав, охлаждаясь, затвердевает.

Процесс изготовления SLS-изделия в общем случае состоит из трех основных этапов: подготовка данных для исполнительного механизма (время  $T_{\text{пд}}$ ); синтез (спекание) изделия (время  $T_{\text{с}}$ ); дополнительная обработка готового изделия (время  $T_{\text{до}}$ ).

Соответственно, общее время изготовления SLS-изделия

$$T_{\Sigma} = T_{\text{пд}} + T_{\text{с}} + T_{\text{до}}. \quad (2)$$

Производительность процесса изготовления SLS-изделия (количество SLS-изделий, изготавливаемых в единицу времени)

$$Q = \frac{1}{T_{\Sigma}} = \frac{1}{T_{\text{пд}} + T_{\text{с}} + T_{\text{до}}}. \quad (3)$$

Наиболее длительный этап изготовления SLS-изделия – синтез изделия, поэтому именно он оказывает наибольшее влияние на производительность. Если  $T_{\text{с}} \gg T_{\text{пд}}$  и  $T_{\text{с}} \gg T_{\text{до}}$ , то  $T_{\Sigma} \approx T_{\text{с}}$ , и, соответственно,

$$Q = \frac{1}{T_{\Sigma}} \approx \frac{1}{T_{\text{с}}}. \quad (4)$$

Время работы SLS-установки по синтезу изделия

$$T_{\text{с}} = \sum_{i=1}^n (t_{\text{pi}} + t_{\text{xi}}), \quad (5)$$

где  $t_{\text{pi}}$  и  $t_{\text{xi}}$  – время рабочих и холостых ходов, соответственно, при изготовлении единичного слоя;

$n$  – число слоев.

С учетом (5) формула для производительности процесса изготовления SLS-изделия (3) может быть представлена в виде:

$$Q = \frac{1}{T_{\Sigma}} = \frac{1}{T_{\text{пд}} + \sum_{i=1}^n (t_{\text{pi}} + t_{\text{xi}}) + T_{\text{до}}}. \quad (6)$$

Синтез SLS-изделия состоит из циклически повторяющихся стадий: нанесение слоя исходного порошка – непосредственное получение слоя изделия – возвращение рабочего органа в исходное положение – перемещение изделия (на необходимую величину, равную толщине слоя) для нанесения последующего слоя. Время синтеза  $T_{\text{с}}$  можно сократить за счет увеличения толщины слоя порошка, скорости сканирования или скорости холостых ходов. Возможности повышения производительности за счет увеличения скорости сканирования, а также скорости холостых ходов ограничены. Это связано с тем, что скорость перемещения рабочих органов современных SLS-установок достигает физически рационального предела и ее чрезмерное увеличение влечет за собой потерю стабильности работы установок. Таким образом, для повышения производительности необходимо стремиться, прежде всего, к сокращению числа слоев, что возможно за счет увеличения толщины единичного слоя.

В методе разбиения модели на слои постоянной толщины, показанном на рис. 2а, увеличение толщины слоев, приводит к уменьшению времени синтеза изделия, одновременно приводит к уменьшению точности воспроизведения модели. Сократить время синтеза изделия при сохранении сравнительно высокой точности воспроизведения модели позволяют методы разбиения модели на слои, показанные на рис. 2б, в. В методе, показанном

на рис. 2б, модель сечется с постоянной толщиной слоя, но особым образом: толщина слоя равна или меньше величины допуска, а образующая профиля проходит через среднюю линию сечений. Недостатком этого метода является появление отклонения от номинального профиля. Указанного недостатка лишен метод, показанный на рис. 2в, в котором модель разбивается на слои с переменной толщиной.

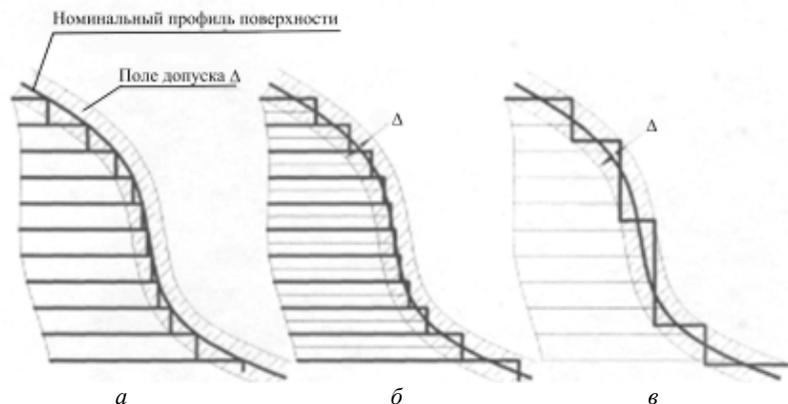


Рис. 2. Методы разбиения SLS-модели на слои

С учетом технологических режимов обработки формулу (6) для расчета производительности SLS-процесса можно представить в виде:

$$Q \approx \frac{1}{T_{\text{пд}} + \left( \frac{4\Phi\sqrt{1-P^2}}{\pi dHV} \right) + \sum_{i=1}^n t_{xi} + T_{\text{до}}}, \quad (7)$$

где  $\Phi$  – объем модели, см<sup>3</sup>;

$d$  – диаметр лазерного пятна, см;

$V$  – скорость сканирования, см/мин;

$P$  – коэффициент технологичности формы модели.

При получении SLS-изделий необходимо обеспечить требуемое качество их поверхности. Эксперименты по получению SLS-изделий показывают, что разные участки поверхности (боковая стенка или граница слоев) изделий могут иметь различный рельеф

(ступенчатый или волнообразный) – в зависимости от условий спекания (рис. 3). Кроме того, независимо от рельефа, для всей поверхности изделий характерна шероховатость.

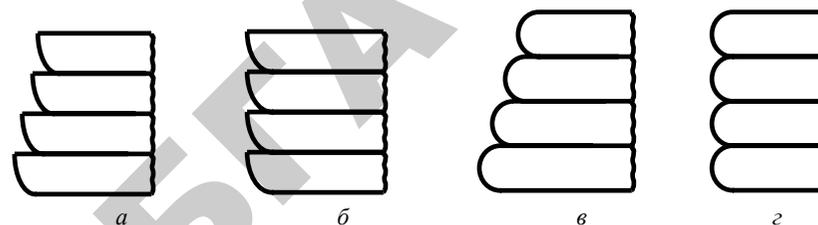


Рис. 3. Разновидности форм рельефа SLS-изделий:

$a, v$  – ступенчатый рельеф;  $b, z$  – волнообразный рельеф;  $a, b$  – на боковой стенке;  $v, z$  – на границе слоев

Ступенчатый и волнообразный рельефы на боковой стенке могут быть сглажены уменьшением толщины  $H$  слоев, формирующих изделие. В свою очередь, ступенчатый и волнообразный рельефы на границе слоев могут быть сглажены уменьшением ширины  $L$  полос спекания, формирующих слои и создаваемых построчно перемещающимся лазерным лучом, либо увеличением ширины  $l$  зон взаимного перекрытия полос спекания. Кроме того, ступенчатый и волнообразный рельефы на границе слоев могут быть практически исключены при контурном перемещении луча.

Шероховатость поверхности изделия уменьшается с уменьшением размеров частиц порошка.

### Оборудование и программное обеспечение для выполнения работы

Для выполнения лабораторной работы необходим персональный компьютер с установленной операционной системой *MS Windows XP* и офисным пакетом *MS Office XP*, включающим текстовый редактор *MS Word* и табличный редактор *MS Excel*. Компьютерная программа лабораторной работы выполнена в среде программирования *Borland Delphi 7*. Программный модуль лабораторной работы представляет собой каталог SSM, включающий в себя следующие файлы.

- основные\_положения.doc – файл *MS Word*. Во избежание модификации или повреждения данного файла, он защищен паролем на изменение и открывается в ходе выполнения работы в режиме «только для чтения».

- Colok.dll и каталог data – служебные файлы проведения коллоквиума для осуществления контроля знаний студентов перед выполнением лабораторной работы.

- выполнение.xls – файл, предназначенный для выполнения расчетов в соответствии с индивидуальным заданием, содержит три рабочих листа для выполнения заданий. Во избежание модификации или повреждения данного файла, он защищен паролем на изменение и открывается в ходе выполнения работы в режиме «только для чтения».

- Project11.exe – файл-оболочка, скомпилированный в среде *Borland Delphi 7*, предназначенный для запуска и выполнения лабораторной работы.

Требования к конфигурации компьютера определяются требованиями офисных программ *MS Excel* и *MS Word*, запускаемых скомпилированной программой-оболочкой. Рекомендуемые параметры конфигурации персонального компьютера:

- 2,21 Mb свободного пространства на жестком диске для размещения необходимых файлов;
- не менее 256 Mb оперативной памяти;
- операционная система *MS Windows XP* и офисные программы *MS Word* и *MS Excel*, версии 2003 или выше для совместимости форматов.

### Порядок выполнения лабораторной работы:

1. *Запуск программы* (запуск на выполнение скомпилированного файла-оболочки Project11.exe). После запуска появляется окно с содержанием лабораторной работы (рис. 4).

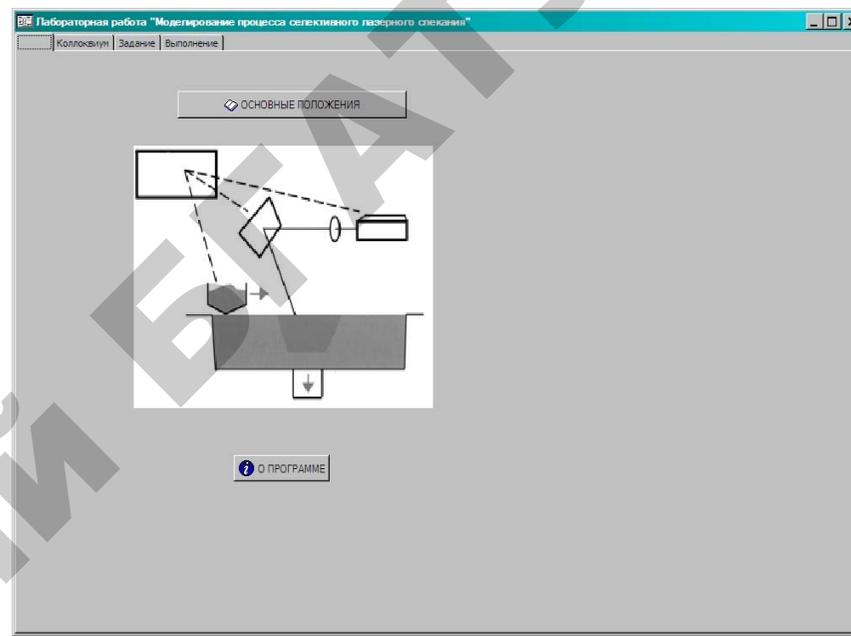


Рис. 4. Диалоговое окно при запуске программы

2. *Ознакомление с основными положениями технологии лазерного спекания*. После нажатия активной кнопки «Основные положения» открывается документ Основные\_положения.doc – файл *MS Word* (только чтение), в котором приведены основные сведения о технологии лазерного спекания, необходимые для выполнения работы.

3. *Коллоквиум*. Для контроля усвоенных знаний необходимо ответить на вопросы коллоквиума. Для этого в основном окне программы необходимо выбрать закладку «Коллоквиум» (рис. 5) и ответить на 10 вопросов по теме выполняемой лабораторной работы.

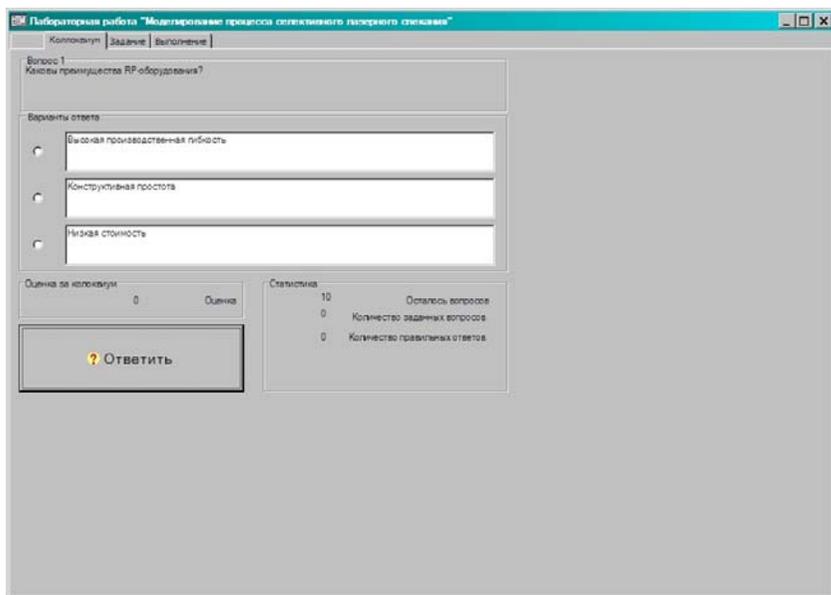


Рис. 5. Диалоговое окно при запуске закладки «Коллоквиум»

Вопросы выбираются программой в случайном порядке из общего списка 20 вопросов базы данных. Для ответа на вопрос необходимо установить флажок напротив правильного варианта и нажать кнопку «Ответить». Правильным ответом считается наиболее точный и полный из предложенных вариантов в соответствии с основными сведениями о технологии лазерного спекания, изложенными в документе «Основные положения». По ходу выполнения задания в рабочем окне приводится статистика: количество заданных и оставшихся вопросов, и количество правильных ответов. При завершении коллоквиума студент получает оценку знаний и может приступить к выполнению лабораторной работы, если эта оценка не ниже 4 (применяется 5-балльная система). При получении оценки ниже 4 баллов возможна следующая попытка ответить на вопросы, сочетание которых каждый раз произвольно меняется программой.

4. *Выполнение лабораторной работы.* Для начала выполнения лабораторной работы необходимо в окне программы перейти на закладку «Выполнение» и нажать кнопку «Запуск программы Excel». При этом вызывается программа Excel и открывается файл Выполнение.xls (рис. 6).

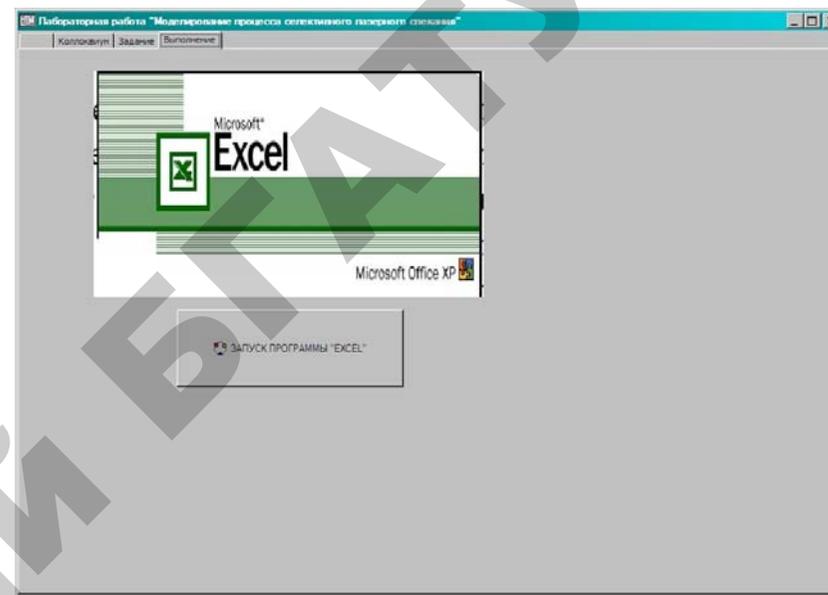


Рис. 6. Диалоговое окно при запуске закладки «Выполнение»

В этом документе открываются листы выполнения различных вариантов заданий, в которых необходимо заполнить таблицы в соответствии с заданием и получить информацию о моделируемом процессе в табличном и графическом виде. Для выполнения работы следует использовать исходные данные, указанные в закладке «Задание».

Для каждого задания исходные данные, полученные результаты моделирования (таблицы и графики) и выводы, сделанные на основе анализа этих результатов, необходимо представить в отчете о выполнении лабораторной работы.

### Варианты заданий

**Вариант 1. Выполнить анализ зависимости коэффициента поглощения смеси порошков от содержания компонентов в смеси.**

Заполнить таблицы в программе Excel и построить графики зависимости коэффициента поглощения смеси порошков от содержания компонентов в смеси в соответствии с формулой (1) для трех наборов параметров процесса, приведенных в задании. Проанали-

зировать построенные графики и сделать вывод о влиянии компонентов смеси на поглотительную способность порошков.

**Вариант 2. Выполнить анализ зависимости производительности SLS-процесса от толщины спекаемых слоев.**

Заполнить таблицы в программе Excel и построить графики зависимости производительности SLS-процесса от толщины спекаемых слоев в соответствии с формулой (7) для двух наборов параметров процесса, приведенных в задании. Проанализировать построенные графики и сделать вывод о влиянии толщины спекаемых слоев на производительность SLS-процесса.

**Вариант 3. Выполнить анализ влияния условий лазерного спекания на геометрические характеристики качества поверхности SLS-изделия.**

Используя экспериментальные данные, введенные в таблицы Excel, построить графики зависимости геометрических характеристик качества поверхности SLS-изделия из полимер-песчаной смеси от параметров SLS-процесса, в том числе: зависимость высоты волнообразного рельефа на боковой стенке изделия от толщины слоев; зависимость высоты волнообразного рельефа на границе слоев изделия от ширины полос спекания; зависимость высоты волнообразного рельефа на границе слоев изделия от ширины зон взаимного перекрытия полос спекания; зависимость шероховатости поверхности изделия от размеров частиц порошка. Проанализировать построенные графики и сделать вывод о характере влияния параметров SLS-процесса на геометрические характеристики качества поверхности изделия.

**Содержание отчета:**

1. Цель работы.
2. Краткие сведения о технологии селективного лазерного спекания.
3. Индивидуальное задание.
4. Результаты моделирования с распечатками исходных данных и результатов моделирования в графической форме.
5. Анализ результатов моделирования.
6. Выводы.

1. Достанко А. П. Технология и техника прецизионного лазерного модифицирования твердотельных структур / А. П. Достанко, Н. К. Толочко, С. Е. Карпович [и др.] / под общ. ред. А. П. Достанко и Н. К. Толочко. Минск : Технопринт, 2002. 375 с.

2. Сапрыкин А. А. Повышение производительности процесса селективного лазерного спекания при изготовлении прототипов: автореф. ... канд. дисс. : 05.16.06. / Сапрыкин А. А. ; Томск: ТПУ, 2006. 16 с.

3. Толочко Н. К. Измерение поглотительной способности свобод-нонасыпанных однокомпонентных металлических порошков и ее изменение в процессе лазерной обработки / Н. К. Толочко, Ю. В. Хлопков, С. Е. Мозжаров [и др.] // Порошковая металлургия, 1997. № 7/8. С. 89–94.

4. Толочко Н. К. Кинетика соединения частиц в условиях их поверхностного плавления в процессе лазерного спекания однокомпонентных металлических порошков / Н. К. Толочко, В. Б. Михайлов, С. Е. Мозжаров [и др.] // Перспективные материалы, 1998. № 5. С. 13–18.

## Лабораторная работа 6

### ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МИКРОСТРУКТУРЫ НАПЛАВЛЕННЫХ И НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

*Цель работы:* изучить основные способы наплавки и напыления; научиться методом микроструктурного исследования определять напыленные и наплавленные покрытия.

*Студент должен знать:* основные способы наплавки и напыления; достоинства и недостатки каждого способа; материалы для наплавки и напыления; отличительные особенности наплавленных и напыленных покрытий;

*уметь:* методом микроструктурного исследования различать наплавленные и напыленные покрытия.

#### Общие сведения

*Наплавка и напыление* – способы нанесения покрытий, которые применяются для нанесения на поверхность деталей или заготовок слоя материала с целью восстановления размеров изношенных поверхностей или для придания поверхности необходимых специальных свойств. Масса покрытия обычно составляет несколько процентов от массы детали. В настоящее время к основным причинам потери работоспособности конструкций и узлов современных машин можно отнести разнообразные виды изнашивания, различного рода коррозию, жидкостную и газовую эрозию. Установлено, что в узлах машин наибольшее число отказов (до 80 %) обусловлено процессами изнашивания или комплексными причинами, где изнашивание играет доминирующую роль. Различные схемы наплавки и напыления являются одним из наиболее рациональных способов упрочнения рабочих поверхностей, и их восстановления.

#### Наплавка

Наплавка – нанесение с помощью сварки слоя металла на поверхность заготовок. Основная отличительная характеристика наплавки – оплавление поверхности, на которую наносится наплавленный слой. Валы рулевых колес, рычаги, тяги, передние оси тракторов, валы приводов водяных насосов, валы коробок

передач, полуоси, распределительные валы, лемехи, лапы культиваторов, ножи скреперов – вот неполный перечень деталей, которые возможно восстанавливать наплавкой.

Существует много видов наплавки: электродуговая, газопламенная, плазменная, электромагнитная и др. Название вида наплавки в основном определяется используемым источником нагрева.

При наплавке в качестве присадочного материала используются наплавочные материалы. Наплавочные материалы (НМ) – металлические или неметаллические материалы, используемые для наплавки металла на изделие с целью восстановления его размеров (восстановительная наплавка) или улучшения эксплуатационных характеристик (износостойкости, коррозионной стойкости и др.).

Требуемые свойства наплавленных покрытий в основном определяются составом НМ. Материалы, наносимые на поверхность при наплавке, используются в виде электродов, проволоки, порошковой проволоки, электродной ленты, порошковой ленты, прутков, гранулированных порошков, смесей порошков, композиционных порошков.

Сплавы, применяемые при наплавке, можно разделить на следующие основные группы:

- 1) стали (углеродистые, марганцовистые, хромомарганцовистые, хромистые, высокохромистые, хромоникелевые, вольфрамовые и молибденовые);
- 2) сплавы на основе железа (высокохромистые чугуны, сплавы с бором и хромом, сплавы с кобальтом, молибденом и вольфрамом);
- 3) сплавы на основе никеля и кобальта;
- 4) сплавы на основе меди;
- 5) карбидные сплавы (с карбидом хрома, вольфрама, титана).

Покрытые электроды имеют стержень и оболочку, которая содержит раскислители, шлакообразующие компоненты защиты, легирующие и стабилизирующие горение дуги вещества. Оболочка выполняет свои функции после расплавления, сгорания или разложения. Электродный стержень обычно изготавливают из проволоки диаметром 2–8 мм. Чаще используют проволоку из низкоуглеродистой стали. Достоинством электрода является универсальность, позволяющая проводить наплавки с применением стандартного сварочного оборудования. Для наплавочных работ разработано более 70 марок электродов.

Для полуавтоматических и автоматических видов наплавки в качестве НМ используются электродные проволоки, порошковые проволоки, холоднокатанные или спеченные электродные ленты.

Проволока сплошного сечения для механизированной наплавки в среде защитного газа и под флюсом имеет диаметр 0,8–2,5 мм. Для получения требуемых свойств и качества наплавленного слоя металла в состав проволоки вводят марганец, кремний, другие раскислители, а также никель, хром, молибден и ванадий для легирования.

Стандартами предусмотрена углеродистая, легированная и высоколегированная стальная проволока. Кроме того, действует стандарт на проволоку из алюминиево-железистой, алюминиево-марганцовистой и кремниевомарганцовистой бронзы.

Порошковую проволоку выпускают трех типов: для наплавки под флюсом, в среде защитных газов и в атмосфере воздуха.

Порошковая проволока состоит из мягкой тонколистовой металлической оболочки и сердцевины, которая представляет собой смесь порошков ферросплавов, чистых металлов, карбидов, боридов, раскислителей, шлакообразующих и стабилизирующих горение дуги веществ (рис. 1). Наиболее распространенный диаметр порошковой проволоки – 2,6–3,6 мм. Однако для наплавки крупногабаритных деталей используют проволоку диаметром до 8 мм.

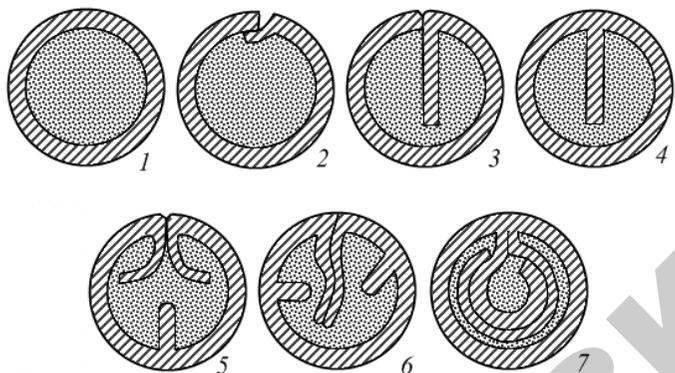


Рис. 1. Конструкции порошковой проволоки:

- 1 – с плотным стыком; 2 – со стыком внахлестку; 3 – с одним загибом оболочки; 4 – с двумя загибами оболочки; 5, 6 – сложного сечения; 7 – двухслойная

Выпускается легированная и высоколегированная проволока, обеспечивающая износостойкую и коррозионно-стойкую наплавку. Для нанесения слоя бронзы на стальные изделия в разработаны порошковые проволоки с медной оболочкой. Например, проволоку

ПП БрАЖ9-4 используют при наплавке в защитном газе, проволоку ПП Бр8-21 – при наплавке под флюсом.

Ленточные электроды позволяют повысить производительность процесса наплавки и уменьшить глубину проплавления основного металла. Стандарты предусматривают использование для наплавки холоднокатаной стальной ленты толщиной 0,4–1,0 мм и шириной 20–100 мм и более. Такую ленту применяют, как правило, при наплавке под флюсом.

Холоднокатаную ленту можно изготовить только из пластичных деформируемых материалов с невысоким содержанием углерода, поэтому изготавливают спеченную и порошковую ленты. Спеченную металлокерамическую ленту на железной основе изготавливают из смеси металлических порошков, ферросплавов, графита и других компонентов путем холодной прокатки смеси и последующего спекания в защитной среде. Порошковую ленту (рис. 2) изготавливают из стальной оболочки и молотых порошков. В отличие от порошковой проволоки, ее не подвергают волочению.

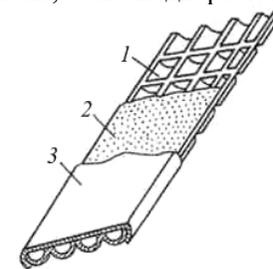


Рис. 2. Порошковая лента:

- 1 – каркас; 2 – порошок; 3 – стальная оболочка

Станы для изготовления порошковой ленты снабжены роликами для формирования и завальцовки оболочки, дозирующим устройством, клетью и валками для уплотнения сердцевины. В порошковую проволоку вводят до 40 % легирующих примесей, а в порошковую ленту – до 70 %.

Кроме проволоки, при электродуговой наплавке в защитных газах (аргон) используют неплавящийся (вольфрамовый) электрод и литые присадочные прутки стеллиты (сплавы никеля или кобальта и карбидов вольфрама) и сормаиты (сплавы железа с углеродом и хромом, содержащие небольшое количество никеля).

При наплавке неплавящимся (угольным) электродом в основном используют порошкообразные материалы. В качестве порошкооб-

разных НМ могут использоваться металлы, сплавы, карбиды и другие материалы, а также их смеси.

НМ, используемые для восстановления деталей сельскохозяйственной и автомобильной техники, можно подразделить на группы в зависимости от условий эксплуатации:

- для наплавки деталей, которые не требуют повышенной поверхностной твердости (валы рулевых колес, рычаги, тяги и др.);
- для деталей, которые после наплавки должны сохранять свои прочностные характеристики (передние оси тракторов, валы привода водяных насосов и др.);
- для деталей, которые изнашиваются в парах трения скольжения (валы коробок передач, полуоси, распредвалы и др.);
- для деталей, которые в процессе работы интенсивно изнашиваются в абразивной среде (лемехи, лапы культиваторов, опорные катки, ножи скреперов и др.).

Наиболее старый и широко распространенный вид наплавки – электродуговая. Электродуговая наплавка осуществляется с помощью плавящихся и неплавящихся электродов. В первом случае дуга горит между наплавляемым материалом и изделием, а во втором – между неплавящимся (угольным или вольфрамовым) электродом и наплавляемым изделием, при этом наплавляемый материал подается в зону дуги. Электродуговая наплавка может быть ручной, автоматической и полуавтоматической.

*Ручная дуговая наплавка* металлическими электродами является самым простым видом. Она позволяет наплавлять поверхность деталей любой формы. Ручная дуговая наплавка универсальна и широко применяется при наплавке штампов, режущего инструмента, рельсовых концов и крестовин, зубьев щек камнедробилок и экскаваторов, бил размольных мельниц и т. п. Твердость наплавленных слоев может быть 25–65 HRC.

Наплавку выполняют короткой дугой на минимальном токе. Для повышения производительности применяют наплавку пучком электродов и трехфазной дугой.

Наиболее широко распространенный для ручной дуговой наплавки вид НМ – покрытые металлические электроды. Восстановительную и антикоррозионную наплавку производят электродами общего назначения, а износостойкую наплавку – наплавочными электродами.

Широко распространена электродуговая наплавка в среде защитных газов (рис. 3). В этом случае в зону электрической дуги

под давлением подается защитный газ, который защищает зону наплавки от окружающей атмосферы. В качестве защитных используются инертные газы (аргон, гелий и их смеси), активные газы (углекислый, водород, водяной пар и их смеси), смеси инертных и активных газов.

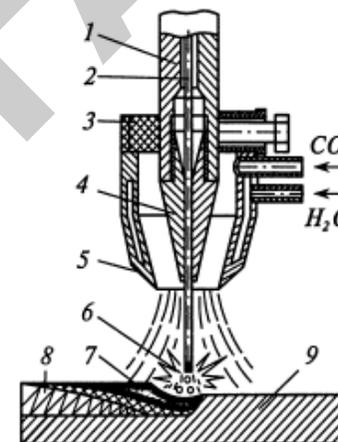
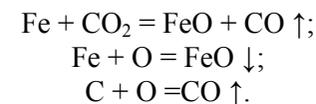


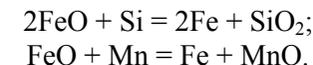
Рис. 3. Схема наплавки в среде диоксида углерода:

- 1 – мундштук; 2 – электродная проволока; 3 – горелка; 4 – наконечник;  
5 – сопло горелки; 6 – электрическая дуга, 7 – сварочная ванна; 8 – покрытие;  
9 – восстанавливаемая деталь

При выборе материалов, используемых при наплавке в среде активных газов, учитывают их реакционную способность. При наплавке в среде  $CO_2$  под действием высокой температуры сварочной дуги он диссоциирует на  $CO$  и  $O$ , которые интенсивно окисляют наплавляемый металл по реакциям:



Окислительное действие  $CO_2$  нейтрализуется введением в сварочную проволоку  $Mn$  и  $Si$ , которые раскисляют ванну шва по реакциям:



Поэтому при сварке в среде  $\text{CO}_2$  применяют сварочную проволоку с повышенным содержанием марганца и кремния. При наплавке в среде защитного газа используют проволоку, состав и свойства которой обеспечивают отсутствие разбрызгивания и высокую технологичность. Наплавка в среде углекислого газа используется для восстановления широкой номенклатуры стальных и чугунных деталей, в т. ч. гладких и шлицевых валов.

Автоматическая и полуавтоматическая наплавка под флюсом (рис. 4) позволяет получить высококачественный наплавленный слой. Во избежание стекания флюса и наплавленного металла наплавку производят в нижнем положении. Крупные детали наплавляют многоэлектродной наплавкой. В качестве НМ используют проволоку, порошковую проволоку, ленту.

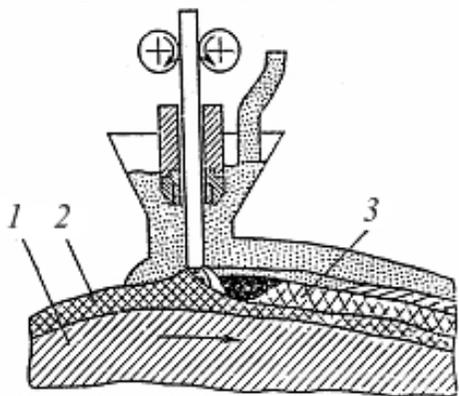


Рис. 4. Схема механизированной наплавки под флюсом:  
1 – металл изделия; 2 – валик, наплавленный за предыдущий оборот;  
3 – валик, наплавленный за данный оборот изделия

При электрошлаковой наплавке (рис. 5) на нагретой поверхности детали формируют ванну расплавленного флюса, в которую вводят электрод. Ток, проходящий от электрода к детали через жидкий шлак, выделяет тепло, достаточное для оплавления поверхности детали, плавления присадочного металла (электрода) и шлака. Присадочный металл после плавления оседает на поверхности детали и с помощью кристаллизатора образует покрытие толщиной 10–20 мм. Электрошлаковую наплавку применяют при необходимости наплавить большое количество металла. Она имеет наибольшую из всех способов наплавки производительность до 150 кг/ч.

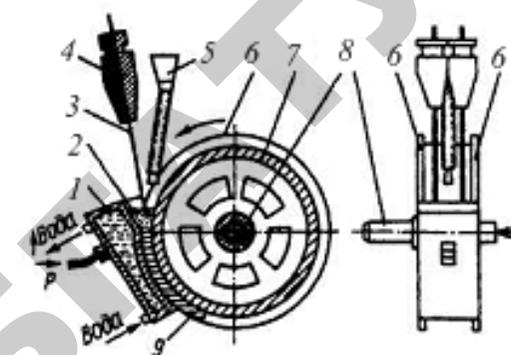


Рис. 5. Схема электрошлаковой наплавки:  
1 – кристаллизатор; 2 – шлаковая ванна; 3 – электрод; 4 – мундштук;  
5 – дозатор легирующих добавок; 6 – габаритные диски;  
7 – восстанавливаемая деталь; 8 – оправка; 9 – покрытие

Сущность вибродуговой наплавки в том, что к вращающейся детали через вибрирующий мундштук под током подается стальная электродная проволока. Вибрация проволоки осуществляется электромагнитным или механическим вибратором с частотой 50 Гц и амплитудой 1,5–2,5 мм. Вибрируя, проволока периодически замыкается с изделием, а при отрыве от него частично расплавляется дугой, которая возникает на конце проволоки в момент разрыва сварочной цепи. При плавлении проволоки на поверхности детали образуется слой металла толщиной 1–2 мм. Для увеличения твердости наплавленного слоя его закалывают охлаждающей жидкостью. Этот вид наплавки применяют при восстановлении изношенных цилиндрических деталей.

Наплавка токами высокой частоты осуществляется с помощью высокочастотного генератора. В этом случае на деталь наносят слой порошкообразной легирующей шихты и флюса или легирующей пасты. После нагрева поверхности в магнитном поле индуктора образуется ровная наплавленная поверхность. Наплавка токами высокой частоты характеризуется высокой производительностью и большими энергетическими затратами.

Газопламенная наплавка применяется в производстве при восстановлении мелких деталей из чугуна, стали, меди, латуни, бронзы, алюминия (рис. 6).

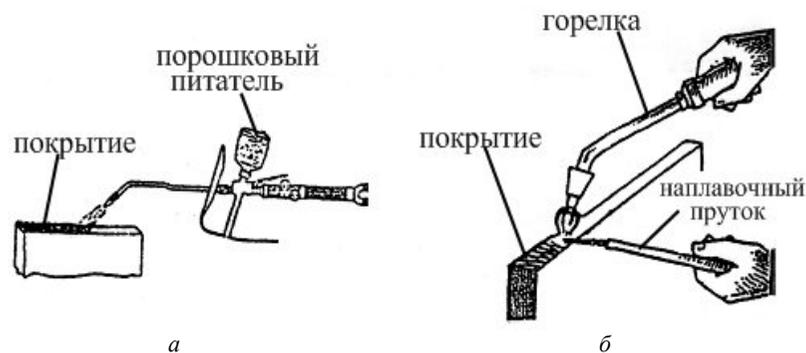


Рис. 6. Газопламенная наплавка:  
а – газопорошковая; б – наплавочным прутком

При газопламенной наплавке часто применяют литые твердые сплавы, изготовленные в виде прутков. При газопорошковой наплавке наиболее часто применяются порошки самофлюсующихся сплавов. Они наносятся на поверхность детали, а затем подогреваются газовым пламенем до оплавления.

Кроме перечисленных выше основных способов наплавки, существуют и развиваются другие способы наплавки, например, с печным нагревом наплавляемых деталей, наплавка намораживанием, электромагнитная лазерная наплавка и др. Например, в институте электросварки им. Е. О. Патона разработан метод «электрофрикционной обработки» для упрочнения кромок почвообрабатывающих органов (рис. 7). Упрочнение осуществляется дисковым чугуном электродом, включенным в электрическую цепь сварочного выпрямителя. Поверхности электрода и изделия размещаются под слоем охлаждающей жидкости (воды), что обеспечивает нагрев до плавления только контактирующих поверхностей. Упрочняемая поверхность изделия оплавляется, расплав легируется элементами, которые входят в состав электрода или охлаждающей жидкости. Например, введение в жидкость порошка карбида бора обеспечивает дополнительное легирование поверхности изделия и расплава. Перемешивание расплава на поверхности осуществляется электромагнитными полями и за счет сил трения. Источником питания является стандартный сварочный выпрямитель (типа ВС-500). В качестве электрода применяется чугунный или спеченный из легированных порошков диск, обеспечивающий

получение упрочненного слоя толщиной 1,5–2,5 мм, при этом не нагревая все изделие. Технология используется для упрочнения плугов, сошников, дисков борон и сеялок, ножей косилок. Работоспособность изделия после упрочнения повышается в 2–6 раз. Прочность сцепления наплавленных покрытий, в среднем, составляет 200–400 МПа.

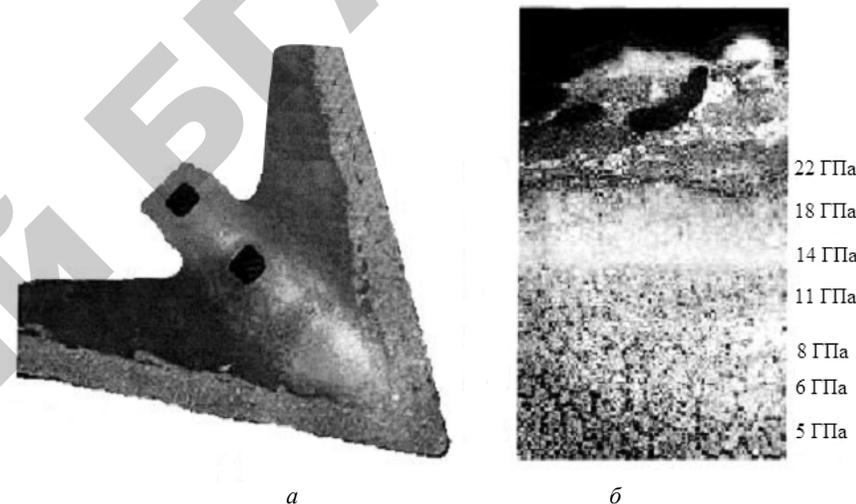


Рис. 7. Упрочненный сошник:  
а – сошник; б – микротвердость упрочненного слоя

Основные свойства наплавленных покрытий определяются наплавляемым материалом. Получение наплавленных покрытий происходит в результате плавления или оплавления наплавляемого материала на поверхности детали. Поверхность наплавляемой детали также частично расплавляется, вследствие чего в наплавленный слой попадают компоненты материала основы. При этом необходимо получить минимальное проплавление металла основы и минимальное перемешивание основного и наплавляемого металлов. В то же время наплавленный металл, прочно соединившись с металлом основы, не должен содержать пор, шлаковых включений, раковин, трещин и других дефектов.

Характерная схема микроструктуры наплавленного покрытия представлена на рис. 8.

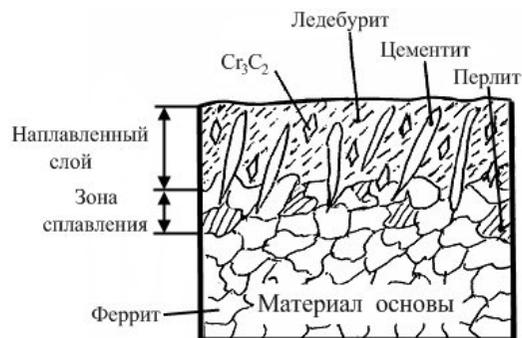


Рис. 8. Схема микроструктуры покрытия, наплавленного хромистым чугуном

Одним из главных недостатков процессов наплавки является высокий уровень подвода тепла к наплавляемой основе. Это ведет к термическому разупрочнению и деформированию деталей при наплавке, и возможно также последующее растрескивание наплавленного слоя. Для уменьшения влияния этих недостатков на качество наплавленных покрытий, как правило, применяется термическая обработка до наплавки и после наплавки. До наплавки наиболее часто применяются средний и высокий отпуск, а после наплавки применяются высокий отпуск, отжиг и закалка. В каждом конкретном случае вид и режим термической обработки зависят от материалов детали и наплавленного покрытия.

### Газотермическое напыление

Напыление – способ нанесения покрытий, при котором наносимый материал распыляется и транспортируется струей газа на поверхность заготовок. Нанесение покрытий конденсированными частицами ведут с помощью газотермических методов напыления. В этих методах материал покрытия подвергают нагреву и плавлению каким либо источником тепла, а затем диспергируют и разгоняют газовым потоком. Для получения газотермических покрытий сложного состава, его компоненты заранее вводят в напыляемые частицы. В зависимости от источника теплоты, различают следующие методы газотермического нанесения покрытий: *электродуговую металлизацию, газопламенное напыление, детонационное или детонационно-газовое напыление и плазменное напыление.*

При электродуговой металлизации образование потока напыляемых частиц происходит за счет плавления распыляемого материала высокоамперной дугой и его диспергирования скоростным потоком газа. В качестве распыляемого материала при дуговой металлизации используется проволока.

Схема электродуговой металлизации приведена на рис. 9а. Через два направляющих мундштука 2 подается проволока 4, по которой проходит сварочный ток. При соприкосновении проволоки в точке 1 в результате короткого замыкания появляется дуговой разряд, и образуются капли металла, которые увлекаются струей сжатого воздуха, поступающего в корпус 3 через рукоятку 5. Расплавленные частицы образуют на поверхности напыляемой детали покрытие 6.

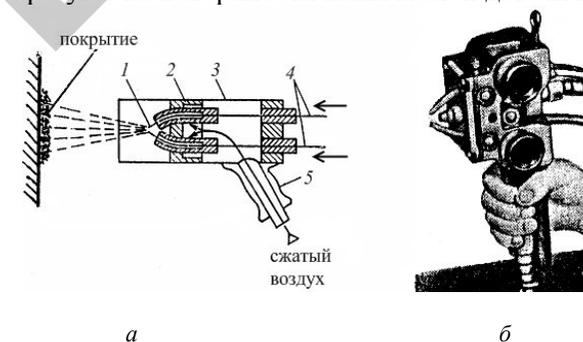


Рис. 9. Электродуговая металлизация:  
а – схема установки для электродуговой металлизации; б – внешний вид электродугового металлизатора

При газопламенном напылении покрытий необходимый запас тепловой и кинетической энергии сообщается нагретым частицам в процессе взаимодействия их с пламенем смеси горючий газ-кислород. В качестве напыляемого материала используются порошки, проволока, гибкие шнуры, прутки. При газопламенном напылении типичны относительно невысокие скорости потока газа (ниже 700 м/с), при этом напыляемые частицы достигают скорости 50–100 м/с и температуры до 3200 °С. Отсюда ограничение напыляемых материалов по температуре плавления (не более 3000 °С) и наличие пористости покрытий (в пределах 5–25 %). Технологии газопламенного напыления совершенствуются. Высокоскоростное газопламенное напыление (наиболее часто встречается название «Jet Cote-процесс») заключается в том, что рабочая смесь газов при

повышенном давлении (3–8 бар) непрерывно подается в зону зажигания. В результате скорость истечения газов повышается до сверхзвуковых скоростей и кинетическая энергия частиц значительно увеличивается. На поверхности напыляемой детали формируется плотное покрытие, так как скорость соударения частиц на поверхности в 4 раза выше, чем при обычном газопламенном напылении, и в 2 раза выше, чем при плазменном напылении в воздушной атмосфере. Данный процесс характеризует очень короткое время пребывания напыляемых материалов в газовой струе (0,004 с).

При газопламенном напылении источником тепловой энергии является пламя, образующееся в результате горения смеси кислород–горючий газ. Напыление в зависимости от состояния напыляемого материала может быть трех типов: проволочное, прутковое и порошковое. Кроме этого, к газопламенному методу относится детонационное напыление, основанное на использовании энергии детонации смеси кислород–горючий газ.

На рис. 10 показан принцип проволочного газопламенного напыления. Прутковое напыление производится аналогичным образом. В обоих случаях напыляемый материал в виде проволоки или прутка подается через центральное отверстие горелки и расплавляется в пламени. Струя сжатого воздуха распыляет расплавленный материал на мелкие частицы, которые осаждаются на обрабатываемой поверхности. Подача проволоки производится с постоянной скоростью роликами, приводимыми в движение встроенной в горелку воздушной турбиной, работающей на сжатом воздухе, используемом для напыления, или электродвигателем через редукционный механизм. При этом необходима точная регулировка скорости вращения турбины или электродвигателя.

При использовании воздушной турбины трудно производить точную регулировку скорости подачи проволоки, однако в этом случае горелка более компактна и имеет меньшие габариты. Поэтому воздушные турбины используют в горелках, которые предназначены для ручного напыления. Горелки с электрическим двигателем позволяют более точно регулировать подачу проволоки и поддерживать ее постоянную скорость. Однако такие горелки имеют значительную массу, поэтому их устанавливают в механизированных установках для напыления. Диаметр напыляемой проволоки обычно не превышает 3 мм. При напылении же металлов с низкими температурами плавления (алюминий, цинк и т. д.) горелками с повышенной производительностью диаметр проволоки может составлять 5–7 мм.

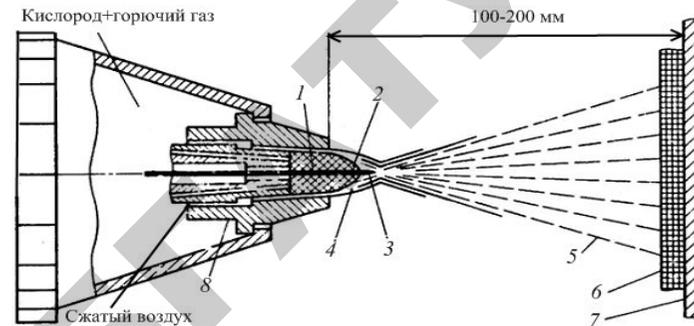


Рис. 10. Проволочное газопламенное напыление:

1 – проволока; 2 – пламя, образующееся при сгорании; 3 – оплавливающийся конец проволоки; 4 – воздушный поток; 5 – частицы металла; 6 – покрытие; 7 – подложка; 8 – мундштук

На рис. 11 показан принцип газопламенного напыления порошкового материала. Напыляемый порошок поступает в горелку сверху из бункера через отверстие, разгоняется потоком транспортирующего газа (смесь кислород–горючий газ) и на выходе из сопла попадает в пламя, где происходит его нагревание. Увлекаемые струей горячего газа частицы порошка попадают на напыляемую поверхность. При напылении порошковых и проволочных сварочных материалов подача напыляемого материала в пламя и разгон образующихся расплавленных частиц может производиться при помощи струи сжатого воздуха.

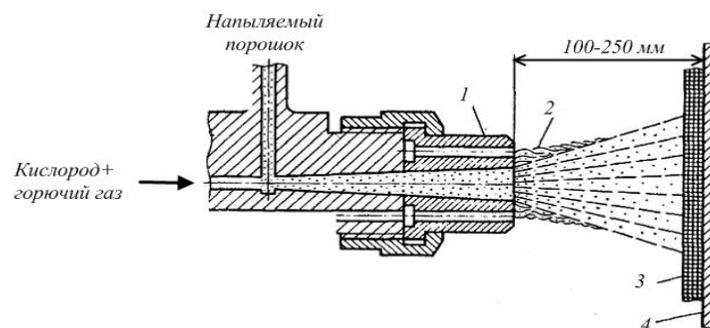


Рис. 11. Газопламенное напыление порошкового материала:

1 – сопло; 2 – факел; 3 – покрытие; 4 – подложка

При детонационно-газовом напылении нагрев и последующий разгон частиц напыляемого материала происходит за счет энергии продуктов детонации газовой смеси (рис. 12).

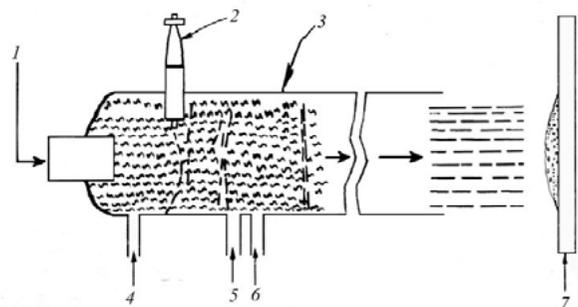


Рис. 12. Устройство детонационной пушки:

1 – ввод порошка; 2 – свеча зажигания; 3 – корпус пушки; 4 – отверстие для подачи азота; 5 – отверстие для подачи ацетилена; 6 – вход для кислорода; 7 – подложка

Используют детонирующие газы  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $H_2$  и др. В качестве напыляемого материала используется порошок. Детонационное напыление относится к циклическим процессам: происходит заполнение камеры сгорания газовой смесью и последующая детонация, приводящая к направленному выбросу газов с частицами порошка, и снова заполнение камеры газом, детонация и т. д. (современные установки производят до 60 выстрелов в минуту). Для повышения производительности используются многоствольные установки. Скорость распространения детонационной волны составляет 2000–4000 м/с (в зависимости от состава смеси газов), а температура достигает 2200–5500 °С. Это обеспечивает достижение частицами скоростей 600–1000 м/с. Пористость покрытий при данном методе 0,5–1,0 %. К недостаткам этого способа можно отнести маленькое время нахождения частиц напыляемого порошка в высокотемпературном потоке, высокий уровень шума (140 дБ и более), что вызывает необходимость установки оборудования в герметичных боксах и обустройство дистанционного управления процессом, и в результате приводит к высокой стоимости оборудования. Развитием процесса детонационно-газового напыления было создание плазменно-детонационного процесса. При этом для ионизации газов в ствол подают высокое напряжение. Это позволило регулировать нагрев частиц в плазменном потоке.

При плазменно-дуговом нанесении покрытий из порошков плавление исходного материала происходит в плазменной струе, температура которой составляет 5000–55 000 °С. Дуговую плазменную струю получают вдуванием плазмообразующего газа в электрическую дугу, образующуюся между двумя электродами (рис. 13). Частицы исходного порошка, попадая в плазменную струю, расплавляются и переносятся на поверхность обрабатываемого изделия со скоростью 50–200 м/с.

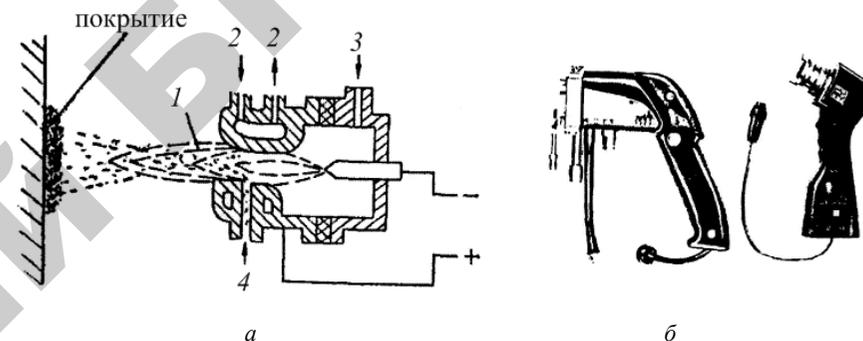


Рис. 13. Плазменно-дуговое нанесение покрытий:

а – схема процесса нанесения покрытий из порошков: 1 – плазменная струя; 2 – каналы подвода и слива охлаждающей воды; 3 – канал подвода плазмообразующего газа; 4 – канал подачи порошка; б – плазмотроны фирм «METCO» (США) и «Plasma-Technik» (Швейцария)

Используя плазменную струю, можно наносить покрытия из самых разнообразных материалов, в том числе и практически из всех тугоплавких материалов. Данным способом можно получить покрытия с самыми разнообразными эксплуатационными характеристиками. Применяя плазму — высокотемпературный источник нагрева, можно наносить покрытия практически из всех тугоплавких материалов, которые в плазменной струе не сублимируют и не претерпевают интенсивного разложения. Одним из способов, позволяющих повысить качество газотермических покрытий, особенно из материалов, подверженных разложению, окислению, азотированию, является плазменное нанесение покрытий в камере с контролируемой атмосферой, подводное плазменное напыление, напыление в динамическом вакууме (напыление производится в вакуумной камере, из которой непрерывно откачиваются рабочие газы). Параметры некоторых способов напыления газотермических покрытий представлены в таблице.

Таблица

Основные параметры способов газотермического напыления

Параметр	Способ напыления		
	электрометаллизационный	газопламенный	плазменный
Производительность установки, кг/ч	3–36	1–10	0,5–8,0
Коэффициент использования напыляемого материала	0,8–0,95	0,8–0,95	0,7–0,9
Прочность сцепления, МПа	до 40	до 50	до 60
Температура частиц материала, К	до 2 000	до 3 000	до 4000
Скорость частиц материала, м/с	50–180	20–120	50–400

При напылении возможно получение покрытий на самых различных конструкциях и материалах – на металлах, стеклах, керамике, пластмассах, тканях, бумаге и т. п.; нанесение на поверхность детали самых разнообразных материалов: металлов, керамики, полимеров, а также композиционных материалов. Возможно послойное нанесение покрытий. В некоторых случаях для повышения адгезионной прочности напыляют подслои – промежуточный слой между поверхностью детали и основного покрытия. Толщина газотермических покрытий обычно составляет 100–500 мкм. При этом напыляемая деталь нагревается до температуры 100–200 °С, что позволяет восстанавливать термообработанные детали. Прочность сцепления напыленных покрытий относительно небольшая 10–60 МПа, но такой прочности сцепления часто вполне достаточно для длительной эксплуатации детали с покрытием.

Наглядным примером эффективности того или иного из используемых методов газотермического напыления покрытий может служить количественный параметр, характеризующий удельные затраты энергии на 1 кг распыляемого материала. Анализ величины указанного параметра для различных методов распыления и зависимость прочности сцепления покрытия от величины этого параметра представлены на рис. 14.

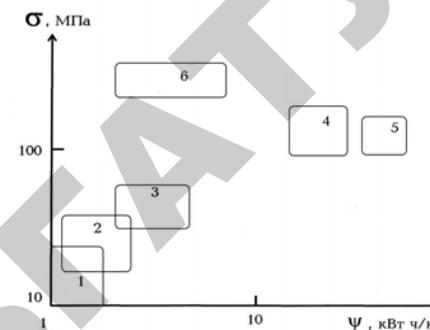


Рис. 14. Зависимость прочности сцепления  $\sigma$  покрытий с основой от удельных энергозатрат  $\psi$ :

1 – электрометаллизация; 2 – газопламенное напыление; 3 – плазменное напыление; 4 – вакуумное плазменное напыление; 5 – высокоскоростное газопламенное напыление; 6 – газопламенная наплавка

Для получения покрытий методом газотермического напыления в настоящее время используют в основном порошки, проволоку, стержни, гибкие шнуры. Однако во всех случаях напыляемый материал диспергируется и попадает на поверхность детали в расплавленном или пластифицированном виде. Газотермическое покрытие — это слоистый материал, состоящий из сильно деформированных частиц, соединенных между собой по контактными поверхностям сварными участками (рис. 15). Сварные участки не заполняют всю площадь контактной поверхности между частицами и поэтому прочность и плотность напыленных покрытий ниже прочности и плотности материала покрытия в компактном состоянии.

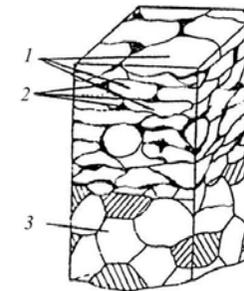


Рис. 15. Схема структуры покрытия:  
1 – деформированные частицы; 2 – поры;  
3 – феррито-перлитная структура основы

### Технологические особенности нанесения наплавленных и напыленных покрытий

В покрытии можно выделить структурные элементы, которые отражают процессы его формирования и разделяются границами раздела с определенными свойствами. Свойства самого покрытия обусловлены прочностью сцепления частиц в нем. Образование покрытия последовательной укладкой множества деформирующихся частиц неизбежно приводит к появлению микропустот (пор), в первую очередь, на стыках частиц. Толщина слоя в различных покрытиях колеблется в достаточно широком интервале в зависимости от назначения покрытия, технологии его нанесения, материалов, входящих в состав покрытия и т. п.

На рис. 16 приведены микроструктуры наплавленного и напыленного покрытий.

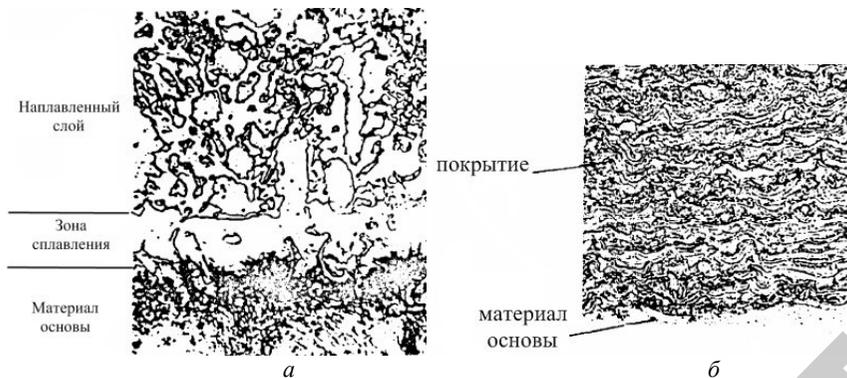


Рис. 16. Микроструктуры наплавленных и напыленных покрытий ( $\times 240$ ):

- а* – покрытие, наплавленное газовым пламенем из порошка (ПГ–СР3);  
*б* – покрытие, напыленное плазмой из порошка (ПТНА–01)

Основным достоинством газотермических покрытий является возможность широкого выбора материалов для напыления покрытия: металлы, сплавы, керамика (карбиды, бориды, нитриды, силициды и др.), смеси и композиционные порошки. Такое разнообразие в выборе материалов позволяет наносить покрытия с широчайшим спектром эксплуатационных характеристик.

Технология получения деталей с наплавленными и напыленными покрытиями, кроме операций наплавки и напыления, содержит операции подготовки поверхности и последующей обработки деталей с покрытиями.

Важную роль в обеспечении высокого качества покрытий, каким бы методом они ни наносились, играет предварительная подготовка поверхности. Часто недостаточное внимание к подготовке поверхности может свести на нет все последующие технологические операции по нанесению покрытий и привести к неисправимому браку в изделиях. Конкретно технология подготовки поверхности определяется составом материала основы, конфигурацией детали, ее габаритами, составом покрытия и способом его нанесения. Независимо от способа нанесения покрытия, целью подготовки поверхности являются ее очистка и активация. Для очистки и активации используют механическое, химическое и термическое воздействие на поверхность.

При механическом воздействии применяют струйно-абразивную (газоабразивную, гидроабразивную) обработку, обработку режущим инструментом (резцом, фрезой, абразивные круги и ленты, металлические щетки, ролики). При химическом воздействии применяют в основном жидкости (растворы щелочей, кислот, солей). Термические методы воздействия на подготавливаемую поверхность разнообразны: газовым пламенем, тлеющим разрядом, лазерным лучом, ионной бомбардировкой и др.

Перед наплавкой для зачистки основного металла используются абразивные дисковые и ленточные инструменты или проводят струйно-абразивную обработку, а в некоторых случаях снимают слой металла на токарных или фрезерных станках. Перед напылением основной способ подготовки поверхности – струйно-абразивная обработка. При этом участки деталей, не подлежащие напылению, обычно защищают картоном, асбестом и др. способами.

После нанесения покрытий детали подвергаются последующей механической обработке для получения необходимых размеров и формы. Детали с наплавленными покрытиями могут подвергаться различным видам термической или термомеханической обработке.

В некоторых случаях газотермические покрытия подвергают последующей термической обработке для улучшения механических свойств. Кроме того покрытия могут пропитывать или различными

составами или окрашивать. Для получения точных размеров деталей с покрытиями производится их последующая механическая обработка. Основной способ механической обработки покрытий – шлифование, но в некоторых случаях могут использоваться точение, фрезерование, сверление. При механической обработке покрытие не должно подвергаться нагружению на растяжение, изгиб, отрыв.

При нанесении защитных покрытий множество факторов, в том числе краткосрочных, влияют на качество покрытий. Поэтому ручное управление при осуществлении наплавки и напыления не позволяет стабильно сохранять уровень качества покрытий, и при разработке технологий и оборудования широко используется их автоматизация.

Наплавка и напыление нашли свое устойчивое место в ряду технологий нанесения покрытий различного назначения. Экономическая целесообразность нанесения покрытий определяется необходимым увеличением срока службы детали с покрытием и сопрягаемой с ней детали, а также относительной себестоимостью детали с покрытием и без него при одинаковых сроках эксплуатации. В НИИ «Порошковая металлургия» газотермическим напылением восстанавливается и упрочняется большая группа деталей автомобильного транспорта в т. ч. выпускные и впускные клапаны, сухари, коленчатые валы тяжело нагруженных двигателей, фрикционные кольца, распределительные валы и др.

Этим же институтом совместно с Белорусским автомобильным заводом (г. Жодино) разработана технология упрочнения серийных и восстановления изношенных шкворней поворотного кулака большегрузных автомобилей семейства «БелАЗ» (грузоподъемность 42–180 т) газопламенным напылением самофлюсующимися сплавами с последующим оплавлением. Разработаны технологии высокоскоростного плазменного и газопламенного нанесения покрытий из шнуровых оксидно-керамических и проволоочных материалов (металлов и сплавов на их основе, включая медь, цинк, алюминий, молибден, низко- и высокоуглеродистые, нержавеющие стали и др. материалы) для защиты от коррозии, износа, а также как декоративные, теплопроводные, термобарьерные, диэлектрические и другие покрытия. Разработана технология нанесения двухслойных антикоррозионных покрытий цинк–полимер и алюминий–полимер для малых архитектурных форм детских учреждений, а также для кузовов сельскохозяйственных машин. Развитие технологий нанесения таких покрытий представляется перспективным в их применении

на малых архитектурных формах, дорожных знаках, отбойниках автомобильных дорог и др.

Наряду с описанными технологиями развиваются новые способы получения покрытий. Например, разработаны микроплазмохимические способы нанесения покрытий. При осуществлении этих технологий целенаправленно преобразуется микроструктура поверхности изделий и на ней формируются композиционные металлические, твердосплавные и керамические покрытия. При этом используются две базовые технологии: электроискрового легирования с ультразвуковым модифицированием электропроводящих материалов (ЭИЛ+УЗМ); анодного микродугового оксидирования в сочетании с электроискровым осаждением различных химических элементов (АМДО). Характеристика покрытий получаемых этими способами следующая: толщина покрытия ЭИЛ+УЗМ – от 1 до 2 мкм; АМДО – от 1 до 100 мкм; твердость обработанной поверхности после обработки – твердосплавные покрытия 70–74 HRC; керамические покрытия 72–76 HRC; шероховатость обработанной поверхности – в пределах от 0,5 до 3,5 мкм; пористость покрытий – 0,5–2,0 %.

Наплавка и напыление широко применяются в сельхозмашиностроении и ремонтном производстве. На рис. 17 и 18 представлены некоторые детали сельхозмашин, упрочняемые и восстанавливаемые наплавкой и напылением.

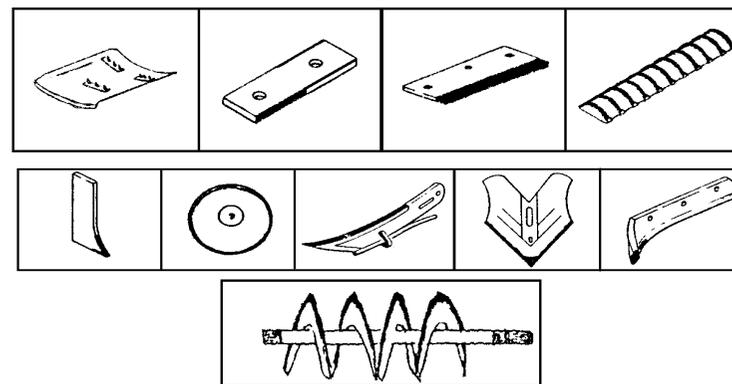


Рис. 17. Некоторые детали сельхозмашин, упрочняемые и восстанавливаемые наплавкой и напылением



Вилки переключателя Выпускные клапаны Синхронизаторные кольца

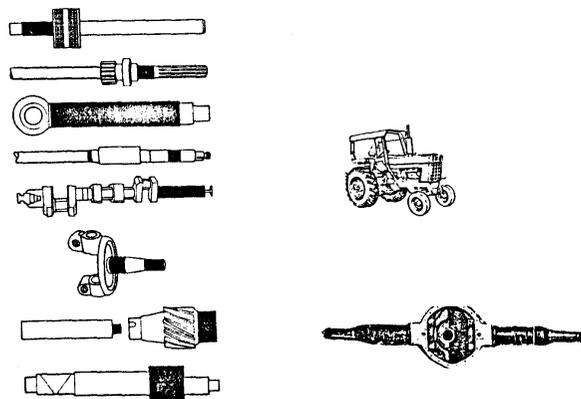


Рис. 18. Некоторые детали трактора, упрочняемые и восстанавливаемые наплавкой и напылением

Износостойкие твердосплавные покрытия повышают ресурс работы металлорежущего, штампового, деревообрабатывающего инструмента в среднем в 2–5 раз. Создание теплоизоляционных, диэлектрических керамических покрытий на поршнях топливных насосов улучшает эксплуатационные характеристики и повышает срок службы в несколько раз. Нанесение на поршень покрытий, обладающих каталитическими свойствами, способствует более полному сжиганию топлива.

### Порядок проведения лабораторной работы

#### Оборудование, инструмент и материалы:

1. Металлографические микроскопы МИМ-7.
2. Образцы микроструктур наплавленных и напыленных покрытий.

#### Последовательность выполнения этапов работы:

1. Изучить основные способы наплавки.
2. Изучить основные способы напыления.
3. Изучить особенности формирования покрытия при наплавке.
4. Изучить особенности формирования покрытия при напылении.
5. Исследовать микроструктуры наплавленных и напыленных покрытий, зарисовать схемы и объяснить их, подчеркнув отличительные признаки.
6. Исследование микроструктуры производится на заранее подготовленных шлифах по заданию преподавателя.

#### Содержание отчета:

1. Цель работы.
2. Общие сведения об основных способах наплавки.
3. Общие сведения об основных способах напыления.
4. Показать особенности формирования покрытий при наплавке и напылении, с учетом особенностей их формирования.
5. Изучить и зарисовать микроструктуры наплавленных и напыленных покрытий и указать на схемах характерные зоны.
6. Выводы.

#### Контрольные вопросы:

1. Что такое наплавка?
2. Что такое напыление?
3. Чем отличается наплавка от напыления?
4. Какие материалы применяются для наплавки?
5. Какие вы знаете способы наплавки?
6. Какие материалы применяются для газотермического напыления?
7. Какие вы знаете способы газотермического напыления?
8. Чем отличаются напыленные и наплавленные покрытия?

#### Литература

1. Хасуй А. Техника напыления. М. : Машиностроение, 1975. 288 с.
2. Кудинов В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / В. В. Кудинов, В. М. Иванов. М. : Машиностроение, 1981. 192 с.
3. Борисов Ю. С. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов [и др.]. Киев : Наукова думка, 1987. 544 с.

Методические рекомендации к выполнению управляемой самостоятельной работы 1

## ПОЛУЧЕНИЕ, СТРОЕНИЕ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАСТМАСС

*Цель работы:* изучить свойства и области применения материалов на основе полимеров.

### Общие сведения

Истощение сырьевых запасов традиционных машиностроительных материалов и, как следствие, увеличение затрат энергии и человеческого труда, связанных с их разведкой, добычей, переработкой и транспортировкой вызвали необходимость разработки новых материалов на основе новых видов сырья, к которым относятся неметаллические материалы (органические и неорганические). Среди органических материалов наиболее широко используются полимеры и материалы на их основе. Детали из пластических масс, изделия из резин, клеи, герметики широко используются в современном машиностроении.

Пластмассы – это неметаллические материалы на основе природных или синтетических высокомолекулярных соединений (смолы, полимеры).

Природными смолами являются вещества биологического происхождения (канифоль, битум, шеллак, янтарь), которые нашли применение как электрорадиоматериалы для изготовления композитов, пропиточных и покрывных лаков.

Синтетическими смолами являются полимеры, получаемые химическими реакциями полимеризации или поликонденсации. Полимеризацией называется реакция взаимного соединения мономеров за счет двойных связей. Полимеризация приводит к образованию высокомолекулярного соединения (полимера). При поликонденсации, кроме полимера, образуются побочные продукты.

Своеобразие свойств полимеров обусловлено их структурой. Различают следующие типы полимерных структур: линейную, линейно-разветвленную, лестничную и пространственную с громоздкими молекулярными группами.

*Пластические массы (пластмассы) – это материалы на основе полимеров.* В них, кроме полимеров, могут входить наполнители, отвердители, пластификаторы, стабилизаторы, красители и другие компоненты.

Полимерами называются материалы, основу которых составляют природные или искусственные высокомолекулярные органические соединения, линейные молекулы которых состоят более чем из тысячи одинаковых повторяющихся звеньев мономеров. Когда не все звенья молекул одинаковы, полимер носит название сополимер. Полимеры бывают естественного (битум, асфальт, канифоль, целлюлоза, шерсть, шелк, каучук и др.) и искусственного (органическое стекло, полиэтилен, капрон, вискоза, каучук и др.) происхождения.

Характеристикой высокомолекулярного (макромолекулы) соединения является молекулярная масса, зависящая от числа повторяющихся звеньев – степени полимеризации. В реальном полимере имеется набор молекул разных размеров, поэтому молекулярная масса полимера является средней величиной из молекулярных масс всех макромолекул, входящих в него.

В технике высокомолекулярные соединения являются основой для получения синтетических полимерных материалов, т. е. материалов, получаемых переработкой полимеров (пластмассы, химические волокна, каучук, резина и др.).

По составу пластмассы разделяют на простые и сложные. Простые (ненаполненные) – это чистые полимеры (полиэтилен), а сложные (наполненные) – состоят из полимера (связующее вещество), наполнителей (ткань, древесина, картон, асбест, порошки металлов и др.), пластификаторов, стабилизаторов, отвердителей и специальных добавок.

Наполнители добавляют в количестве 40–70 % (по массе) для повышения механических свойств, уменьшения усадки и снижения стоимости материала (стоимость наполнителя ниже, чем стоимость смолы). Однако наполнитель повышает гигроскопичность пластмасс и ухудшает электрические характеристики.

Пластификаторы (глицерин, касторовое или парафиновое масло) вводят в количестве 10–20 % для уменьшения хрупкости и улучшения формовости.

Стабилизаторы (сажа, сернистые соединения, фенолы) вводят в количестве нескольких процентов для замедления старения, что стабилизирует свойства и удлиняет срок эксплуатации. Старение –

самопроизвольное необратимое изменение важнейших эксплуатационных характеристик материала в процессе эксплуатации и хранения, происходящее в результате сложных физико-химических процессов.

Отвердители вводят также в количестве нескольких процентов для соединения полимерных молекул химическими связями.

Специальные добавки (смазки, красители) вводят для уменьшения статических зарядов, горючести, защиты от плесени.

При изготовлении поро- и пенопластов добавляются порообразователи – вещества, которые при нагреве размягчаются, выделяя большое количество газов, вспенивающих смолу.

По отношению к нагреванию и растворителям пластмассы делятся на термопластичные и термореактивные.

*Термопластичные полимеры (термопласты)* – полимеры, которые могут многократно размягчаться при нагреве и твердеть при охлаждении без изменения свойств. В этих полимерах между молекулами действуют слабые силы Ван-дер-Ваальса, и нет химических связей. Термопласты обладают также растворимостью в растворителях.

*Термореактивные полимеры (реактопласты)* при нагревании до определенной температуры расплавляются и в результате химических реакций при этой же температуре при охлаждении твердеют (как говорят, «запекаются»), превращаясь в жесткое, неплавящееся и нерастворимое вещество. В этом случае, наряду со слабыми силами Ван-дер-Ваальса, действуют прочные химические связи между молекулами, называемые поперечными. Их возникновение и составляет суть процесса отверждения полимера.

По убывающему влиянию наполнителя пластмассы разделяют на следующие виды:

- 1) с листовым наполнителем (гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, древесно-слоистый пластик);
- 2) с волокнистым наполнителем (волокнит, асболокнит, стекловолокнит);
- 3) с порошковым наполнителем (фенопласты, аминопласты, эпоксидные пресс-порошки);
- 4) без наполнителя (полиэтилен, полистирол);
- 5) с газовоздушным наполнителем (пенопласты).

Гетинакс состоит из двух или более слоев прочной, нагревостойкой, пропиточной бумаги, обработанной термореактивной фенолформальдегидной смолой резольного типа (бакелитом). С целью повышения нагревостойкости в некоторые марки гетинакса допол-

нительно вводят кремнийорганические вещества, а для повышения клеящей способности – эпоксидные смолы. Гетинакс – дешевый материал, используемый для изготовления различного рода плоских электроизоляционных деталей и оснований печатных плат. Нагревостойкость гетинакса – 135 °С. Недостатки: легкость расслаивания вдоль листов наполнителя, гигроскопичность (это ухудшает электроизоляционные свойства). Для защиты от влаги поверхность покрывают лаками.

Текстолит – прессованный материал на основе листов хлопчатобумажной ткани, пропитанной, как и гетинакс, бакелитом. Он легче обрабатывается, чем гетинакс, имеет более высокие водостойкость, прочность при сжатии и ударную вязкость. Текстолит дороже гетинакса в 5–6 раз. Нагревостойкость – 150 °С.

Стеклотекстолит – материал, состоящий из двух или более слоев бесщелочной стеклоткани, пропитанной различными термореактивными смолами. Стеклотекстолит, по сравнению с гетинаксом и текстолитом, обладает повышенной влагостойкостью, нагревостойкостью и лучшими электрическими и механическими параметрами, но хуже обрабатывается механически. Стеклотекстолит имеет хорошую демпфирующую способность (способность гасить вибрации) и превосходит в этом отношении стали, сплавы титана. По тепловому расширению он близок к сталям. Нагревостойкость – 185 °С. Стеклотекстолит находит широкое применение, так как в нем сочетаются малый вес, высокая прочность, нагревостойкость и хорошие электрические свойства. Древесно-слоистый пластик – материал с наполнителем в виде опилок или шпона.

Возможность использования в промышленности пластмасс определяется их основными свойствами.

Большинство пластмасс имеют плотность от 0,9 до 1,5 т/м, самые легкие – полиэтилен и полистирол, а самый тяжелый – фторопласт.

Пластмассы стойки к долговременному действию промышленных агрессивных сред и применяются для изготовления защитных покрытий на металлы. Пластмассы не подвержены электрохимической коррозии. Есть пластмассы, стойкие к действию концентрированных кислот и щелочей.

Большинство пластмасс безвредно в санитарном отношении.

Под действием окружающей среды пластмассы медленно стареют, то есть необратимо изменяют свои свойства.

Большинство полимеров может длительно работать лишь при температурах ниже 100 °С. Выше этой температуры, как правило, происходит быстрое старение материала.

У пластмасс высокие теплоизоляционные свойства. Пластмассы плохо проводят теплоту, сильно расширяются при нагреве и имеют значительную теплоемкость.

Теплопроводность пластмасс в сотни раз меньше, чем у металлов. Наименьшую теплопроводность имеют пористые пластмассы. Коэффициент теплового расширения полимеров в 10–30 раз больше, чем у металлов.

Механические свойства имеют широкий диапазон. Пластмассы характеризуются вязкоупругим поведением полимеров под нагрузкой. Деформация полимера – это сумма упругой, высокоэластичной и вязкотекучей деформаций. Пластмассы имеют низкие модули упругости (малую жесткость), хуже сопротивляются растяжению, чем сжатию, хорошо сопротивляются усталости.

Пластмассы технологичны, т. е. изделия из них просты в изготовлении, коэффициент использования высок (безотходные технологии).

В современных технологиях широко используются пленкообразующие материалы.

Пленкообразующие материалы – это растворы или расплавы полимеров, а также неорганические вещества, которые наносятся на какую-либо поверхность, а после высыхания (затвердевания) образуются прочные пленки, хорошо прилипающие к различным материалам.

К пленкообразующим материалам относятся клеи и герметики. Клеи и герметики могут быть в виде жидкостей, паст, замазок, пленок. В состав этих материалов входят следующие компоненты: пленкообразующее вещество (в основном термореактивные смолы, каучуки), которое определяет адгезионные, когезионные свойства и основные физико-механические характеристики; растворители (спирты, бензин и др.), создающие определенную вязкость; пластификаторы для устранения усадочных явлений в пленке и повышения ее эластичности; отвердители и катализаторы для перевода пленкообразующего вещества в термостабильное состояние; наполнители в виде минеральных порошков, повышающих прочность соединения, уменьшающих усадку пленки. Для повышения термостойкости вводят порошки Al, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, для повышения токопроводимости – серебро, медь, никель, графит.

В зависимости от назначения пленкообразующие материалы делят на клеящие, применяемые для склейки различных материалов, и герметики, обеспечивающие уплотнение и герметизацию швов, стыков, емкостей и т. д.

## План реферата по изучаемой теме

Пользуясь рекомендуемым списком литературы, а также научными статьями и другими источниками по предлагаемой тематике, следует представить реферат в соответствии с предлагаемым планом.

1. Полимеры.
  - 1.1. Классификация полимеров.
  - 1.2. Свойства полимеров.
2. Пластические массы.
  - 2.1. Состав, классификация и свойства пластмасс.
    - 2.1.1. Термопластичные пластмассы.
    - 2.1.2. Термореактивные пластмассы.
    - 2.1.3. Газонаполненные пластмассы.
3. Полимерные композиционные материалы.
4. Способы получения изделий из пластмасс.
  - 4.1. Методы соединения пластмасс.
5. Целесообразность применения изделий из пластмасс.
6. Резиновые материалы.
  - 6.1. Состав и классификация резин.
  - 6.2. Технология изготовления резиновых изделий.
7. Пленкообразующие материалы.
  - 7.1. Клеящие материалы.
  - 7.3. Свойства клеевых соединений.
  - 7.4. Герметики.

## Литература

1. Лахтин Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, И. П. Леонтьева. М. : Машиностроение, 1990. 528 с.
2. Пинчук Л. С. Материаловедение и конструкционные материалы / Л. С. Пинчук [и др.] : под ред. В. А. Белого. Мн. : Вышэйшая школа, 1989. 461 с.
3. Мозберг Р. К. Материаловедение: учебн. пособие. – 2-е изд. перераб. – М., 1991. – 488 с.
4. Власов С. В. Основы технологии переработки пластмасс / С. В. Власов, Э. Л. Калинин, В. Н. Кулезнев [и др.]. М. : Химия, 1995. 528 с.
5. Энциклопедия полимеров. В 3 т. М. : Советская энциклопедия, 1972.

Методические рекомендации к выполнению управляемой самостоятельной работы 2

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Цель работы:* изучить свойства и области применения композиционных материалов.

### Общие сведения

Многие материалы обладают определенным комплексом свойств, например, из широко распространенных материалов бетон, с его высокой жесткостью и хрупкостью, отлично работает на сжатие и не работает на растяжение. Поэтому бетонные конструкции давно используются в качестве фундаментов и различных опор. Металлы обладают пластичностью и высокой прочностью и достаточно хорошо работают на растяжение. Поэтому из материала, состоящего из металла и бетона – «железобетон», изготавливают конструкции, имеющие достаточную жесткость и одновременно работающие на растяжение: перекрытия, балки, пролеты мостов и др. Такие материалы, сочетающие в себе свойства, присущие порознь нескольким материалам, называются обычно композиционными материалами (КМ). История использования человеком композиционных материалов насчитывает много веков, а представление о композиционных материалах заимствовано человеком у природы. Уже на ранних стадиях развития цивилизации человек использовал для строительства кирпич из глины, в которую замешивалась солома, придававшая повышенную прочность. Некоторые древние уникальные материалы, например, булатная сталь, так же является композиционным материалом.

Композиционные материалы – это материалы, обладающие следующей совокупностью признаков: состоят из двух или более компонентов, различающихся по своему химическому составу и разделенных выраженной границей; имеют новые свойства, отличающиеся от свойств составляющих их компонентов; неоднородны в микромасштабе и однородны в макромасштабе; свойства определяются каждым из компонентов, которые в связи с этим должны быть в материале в достаточно большом количестве (больше некоторого критического содержания).

Компонент непрерывный во всем объеме КМ называется матрицей, прерывистый, разьединенный в объеме композиции элемент (элементы) называется армирующим элементом (наполнителем).

В зависимости от геометрии армирующих элементов и их взаимного расположения КМ бывают изотропными или анизотропными.

Первые имеют одинаковые свойства во всех направлениях, свойства вторых зависят от направления армирующих элементов. К макроскопически изотропным КМ относятся дисперсно-упрочненные сплавы, псевдосплавы и хаотично армированные КМ; к анизотропным КМ – материалы, в которых волокна ориентированы в определенных направлениях. Хаотично армированные КМ упрочняются короткими (дискретными) частицами игольчатой формы (отрезками волокон или нитевидными кристаллами – так называемыми усами), ориентированными в пространстве случайным образом. При этом КМ получают квазиизотропными, т. е. анизотропными в микрообъемах, но изотропными в объеме всего изделия.

Композиционные материалы классифицируют по различным признакам: материалу матрицы и армирующих элементов, геометрии компонентов, структуре и расположению компонентов, методу получения. Иногда КМ разделяют по назначению, но так как одни и те же КМ могут иметь различное назначение, то этот принцип классификации используется редко. Полная характеристика КМ должна содержать все указанные признаки, на практике же обычно ограничиваются одним или двумя из них.

Общее название КМ, как правило, происходит от материала матрицы. КМ с металлической матрицей называют металлическими КМ, с полимерной – полимерными КМ, с неорганической – неорганическими КМ.

КМ, содержащий два и более различных по составу или природе матричных материала, называется полиматричным.

По геометрии наполнителя композиционные материалы подразделяют на три группы:

- с нульмерными наполнителями, размеры которых в трех измерениях имеют один и тот же порядок;
- с одномерными наполнителями, один из размеров которых значительно превосходит два других;
- с двумерными наполнителями, размеры которых значительно превосходят третий.

## План реферата по изучаемой теме

По схеме расположения наполнителей выделяют три группы композиционных материалов:

– с одноосным (линейным) расположением наполнителя в виде волокон, нитей, нитевидных кристаллов в матрице параллельно друг другу;

– с двухосным (плоскостным) расположением армирующего наполнителя в виде волокон, матов из нитевидных кристаллов, фольги в матрице в параллельных плоскостях;

– с трехосным (объемным) расположением армирующего наполнителя и отсутствием преимущественного направления в его распределении.

При разработке и изготовлении новых КМ, а также при создании конструкций из них приходится учитывать влияние на эти материалы внешних условий (температура, высокая влажность). Необходимо принимать во внимание и ряд специфических свойств КМ. Так, учет ползучести, которая является характерным свойством многих КМ, заставляет проектировщиков отказываться от ряда традиционных решений.

Цель создания КМ сводится к объединению схожих или различных компонентов для получения материала с новыми заданными свойствами и характеристиками, отличными от свойств и характеристик исходных компонентов. С появлением такого рода материалов возникла возможность селективного выбора свойств композитов, необходимых для нужд каждой конкретной области применения. КМ, оказавшиеся и экономичными, и удобными в проектировании, сегодня используются везде.

КМ находят широкое применение при изготовлении объектов общественного транспорта, автомобилей, судов, самолетов и ракет, емкостей для хранения жидкостей и в различных областях электроники. Они используются для создания трубопроводов и стволов артиллерийских орудий, в приборостроении и как отделочные материалы. КМ активно потребляют медицинская промышленность и производство снаряжения для активного отдыха.

Композиционные материалы в настоящее время все больше используются в самых передовых образцах техники: авиации (самолеты Су-26, Су-29, Су31, Су-33, Су-47, ТУ-204, ТУ-224, ТУ-334, Бе-200); космических аппаратах; ракетах-носителях («Протон-М», «Рокот», «Ангара»). В конструкциях этих ракет-носителей доля КМ составляет 20–90 %. Доля КМ среди материалов, используемых для своих нужд современной цивилизацией, постоянно нарастает.

Пользуясь рекомендуемым списком литературы, а также научными статьями и другими источниками по предлагаемой тематике, следует представить реферат в соответствии с предлагаемым планом:

1. Общие сведения о композиционных материалах
2. Классификация композиционных материалов.
3. Композиционные материалы с различным типом наполнителя.
4. Композиционные материалы с металлической матрицей.
5. Композиционные материалы с полимерной матрицей.
6. Композиционные материалы с неорганической матрицей.
7. Полиматричные композиционные материалы.
8. Применение композиционных материалов.

## Литература

1. Новые материалы и технологии: пособие / В. М. Капцевич, В. Р. Калиновский, В. К. Корнеева. Минск : БГАТУ, 2010. 284 с.
2. Капцевич В. М. Новые материалы: технологии изготовления и области применения / В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, Д. И. Кривальцевич. Минск : БГАТУ, 2010. 232 с.
3. Композиционные материалы. Справочник / под ред. Д. М. Карпиноса. Киев : Наукова думка, 1985. 600 с.
4. Композиционные материалы ядерных реакторов / Н. М. Бескорвайный, Ю. С. Беломытцев, М. Д. Абрамович [и др.] ; под ред. Н. М. Бескорвайного. М. : Атомиздат, 1972. 252 с.
5. Композиционные материалы / И. Н. Фридляндер, М. Х. Шоршоров, К. И. Портной [и др.] ; под ред. А. И. Манохина. М. : Наука, 1981. 292 с.
6. Лахтин Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, И. П. Леонтьева. М. : Машиностроение, 1990. 528 с.
7. Арзамасов Б. Н. Материаловедение / Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин [и др.]. Изд. 2-е. М. : Машиностроение, 1986. 648 с.

Методические рекомендации к выполнению управляемой самостоятельной работы 3

## МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

*Цель работы:* изучить свойства и области применения аморфных металлических сплавов и материалов с памятью формы.

### Общие сведения

Совершенствование машин, механизмов, приборов выдвигает требования создания материалов с особыми свойствами. В современном машиностроении широко используют стали и сплавы, обладающие особыми свойствами: заданной проводимостью, сверхпроводимостью, полупроводниковыми и магнитными свойствами, способностью восстанавливать заданную форму изделия и т. д. Специальные свойства таких материалов обусловлены определенным соотношением компонентов сплава, особенностями строения элементов, входящих в его состав, структурным состоянием материала. К таким материалам относятся *аморфные материалы и материалы с памятью формы*.

Большинство металлов и сплавов, используемых в промышленности, имеют кристаллическую структуру. Им присуще упорядоченное строение кристаллических образований. В процессах кристаллизации расплавов металлов их охлаждение происходит в какой-то отрезок времени, а с этим временем связаны два основных параметра: скорость зарождения центров кристаллизации и скорость роста кристаллов. При этом образуются кристаллические структуры с анизотропией свойств, связанной с тем, что блоки, зерна имеют границы, на которых концентрируются дефекты и другие явления. Во второй половине двадцатого века было установлено что, при сверхвысоких скоростях охлаждения из жидкого состояния (со скоростью  $>10^6$  °C/с) диффузионные процессы и зарождение центров кристаллизации настолько замедляются вследствие быстрого нарастания вязкости расплава, что подавляется образование зародышей и рост кристаллов. В этом случае при затвердевании образуются неупорядоченные структуры.

Сплавы с такой структурой получили название аморфные металлические сплавы или металлические стекла. *Аморфные метал-*

*лические сплавы полностью изотропны, свойства во всех направлениях совершенно одинаковы.*

Аморфное состояние обеспечивает металлическим материалам свойства, значительно отличающиеся от свойств соответствующих материалов с кристаллической структурой. Сплавы в аморфном состоянии обладают высокой твердостью, коррозионной стойкостью, пластическая деформация не сопровождается скольжением или двойникованием и имеет характер вязкого, весьма затрудненного течения, а уровень электромагнитных потерь в аморфных сплавах с высокой магнитной индукцией оказывается существенно ниже, чем во всех известных кристаллических сплавах.

Материалы с *эффектом памяти формы* являются прототипами так называемых «интеллектуальных» материалов будущего. «Интеллектуальные» материалы, помимо обычных, например, для металлов механических свойств, присущих традиционным материалам, обладают также функциональными свойствами. Одним из наборов функциональных свойств являются свойства датчика (сенсора) – свойство, которое позволяет материалу реагировать на изменение окружающей среды; свойство процессора, т. е. возможность оценить ситуацию и сделать выводы и, наконец, исполнительное свойство (актуатор), при котором материал совершает действие или подает сигналы.

«Эффект памяти механической формы» заключается в свойстве пластически деформированного при повышенных температурах образца, а затем деформированного при данной температуре до потери первоначальной формы, восстанавливать ее при повторном нагреве.

Деформирование при повышенных температурах проводят в диапазоне температур существования в материале образца устойчивой фазы. Низкотемпературное деформирование осуществляют при температурах фазового превращения или близких к ним. Важнейшим компонентом сплавов с «эффектом памяти» является термоупругий мартенсит.

Сплавы с ЭПФ в настоящее время используются для решения многочисленных практических задач: в силовом оборудовании и самосооружающихся трансформируемых конструкциях, в мартенситных преобразователях энергии (мартенситные приводы и мартенситные двигатели), в системах автоматического регулирования расхода и температуры, в устройствах тепловой, электрической и пожарной защиты, в элементах робототехники, при создании неразъемных соединений, в медицине для изготовления самораскрывающихся антенн космических кораблей и др.

## План реферата по изучаемой теме

Пользуясь рекомендуемым списком литературы, а также научными статьями и другими источниками по предлагаемой тематике, следует представить реферат в соответствии с предлагаемым планом:

1. Общие сведения об аморфных металлических сплавах.
2. Методы получения аморфных сплавов.
3. Области применения аморфных сплавов.
4. Общие сведения о материалах с эффектом памяти формы.
5. Механизм эффекта памяти формы и основные типовые материалы с этим свойством.
6. Применение материалов с эффектом памяти формы.

## Литература

1. Новые материалы и технологии: пособие / В. М. Капцевич, В. Р. Калиновский, В. К. Корнеева. Минск : БГАТУ, 2010. 284 с.
2. Капцевич В. М. Новые материалы: технологии изготовления и области применения / В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, Д. И. Кривальцевич. Минск : БГАТУ, 2010. 232 с.
3. Верещагин М. Н. Получение аморфных сплавов из расплавов / М. Н. Верещагин, А. В. Степаненко. Минск : Технопринт, 2004. 282 с.
4. Материалы с эффектом памяти формы : справ. изд. / под. ред. В. А. Лихачева. Т. 1–4. СПб. : НИИХ СПбГУ, 1997. 998 с.
5. Лихачев В. А. Эффект памяти формы / В. А. Лихачев, С. Л. Кузьмин, З. П. Каменцева. Л. : ЛГУ, 1987. 216 с.
6. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Оцука, К. Симидзу. М. : Metallurgia, 1990. 224 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Сортамент проката

Форма поперечного сечения проката называется профилем, совокупность различных профилей всевозможных размеров – *сортаментом* проката.

Сортамент прокатываемых профилей весьма разнообразен. Различают сортовой, листовой, трубный прокат, прессованные и гнутые профили, проволоку, периодический и специальный прокат, биметаллические и другие полуфабрикатные металлоизделия, используемые в качестве заготовок.

Сортовой прокат включает профили простой геометрической формы – круг, квадрат, прямоугольник, шестигранник, треугольник, ромб, овал, сегмент и др.; фасонные профили общего назначения – уголок равно- и неравнополочный, швеллер, тавр, двутавр, рельс и др.; фасонные профили специального назначения – для сельхозмашиностроения, автотракторостроения, вагоностроения, судостроения, строительства и других отраслей промышленности.

Круглая горячекатаная сталь (ГОСТ 2590-88) диаметром 5–250 мм подразделяется по точности прокатки на три группы: высокой (А), повышенной (Б) и обычной (В) точности.

Сталь до 9 мм поставляется в мотках, свыше 9 мм – в прутках длиной 1,5–10,0 м или мотках (бухтах). Прутки изготавливаются из углеродистых, низко-, средне- и высоколегированных сталей.

Пример условного обозначения горячекатаной круглой стали диаметром 60 мм с полем допуска h14, ГОСТ 2590-88, марка сталь 45, категория 5, ГОСТ 1050-88, термически обработанная (Т):

$$Круг \frac{60 - h14 \text{ ГОСТ } 2590 - 88}{45 - 5 - Т \text{ ГОСТ } 1050 - 88}.$$

Квадратная горячекатаная сталь (ГОСТ 2591-88) со стороной квадрата 5–200 мм поставляется в прутках длиной 1,5–10,0 м.

Шестигранная горячекатаная сталь (ГОСТ 2879-88) имеет размер «под ключ» 8–100 мм, длину прутков 2–6 м.

Горячекатаная сталь прямоугольного сечения (полосовая сталь ГОСТ 103-76), поставляется шириной 12–200 мм, толщиной 4–60 мм, длиной 2–10 м.

Угловая равнополочная горячекатаная сталь (ГОСТ 8509-93) изготавливается с номерами профилей 2–25 (20–250 мм), толщиной полок 3–30 мм, длиной 4–9 м.

Угловая неравнополочная горячекатаная сталь (ГОСТ 8510-86) поставляется с номерами профилей 2,5/1,6–25/16, с толщиной полок 3–20 мм, длиной 4–9 м.

Швеллеры (ГОСТ 8240-72) изготавливаются с номерами 5–40, шириной полки 32–115 мм, толщиной спинки 4,4–8 мм, длиной 5–19 м.

Двутавровые балки (ГОСТ 8239-89) выпускаются с номерами 10–60, шириной полки 55–190 мм, толщиной стенки 4,5–12 мм, длиной 5–19 м.

Балки двутавровые специальные для подвесных путей (ГОСТ 19425-74) имеют номера 18, 24, 30, 36 и 45.

Рельсы железнодорожные и специальные имеют определенные размеры профиля и характеризуются массой одного погонного метра рельса.

Фасонные профили специального назначения имеют самую разнообразную форму и размеры, выпускаются по существующим ГОСТ или отраслевым и заводским нормам. Фасонные горячекатаные профили специального назначения выпускают для тракторостроения и сельхозмашиностроения, авиастроения, вагоностроения, судостроения и для других отраслей.

Листовой прокат делится на горяче- и холоднокатаный, тонко- и толстолистовой, может поставляться в виде листов, рулонов, полос и лент.

Листовая горячекатаная сталь (ГОСТ 19903-74) поставляется толщиной 0,5–160,0 мм, шириной 600–3800 мм. Длина листов 1,2–12,0 м.

Рулонная горячекатаная сталь (ГОСТ 19903-74) бывает толщиной 1,2–12,0 мм, шириной 500–2200 мм.

Широкополосная универсальная горячекатаная сталь (ГОСТ 82-70) поставляется толщиной 6–60 мм, шириной 200–1050 мм, длиной 5–18 м.

Лента стальная горячекатаная (ГОСТ 6009-74) имеет толщину 1,5–5,0 мм, ширину 2–200 мм.

Трубный прокат включает цельные (бесшовные) и сварные (шовные) трубы. Сварной шов на трубах может располагаться по образующей цилиндра или по спирали. По назначению различают трубы общего назначения, водопроводные, газопроводные, котельные, бурильные; по профилю – круглые, квадратные, прямоугольные, треугольные и др.

Бесшовные круглые горячекатаные стальные трубы (ГОСТ 8732-78) изготавливаются наружным диаметром 25–820 мм, толщиной стенки 2,5–75,0 мм, длиной 4,0–12,5 м.

Электросварные прямошовные круглые горячекатаные стальные трубы (ГОСТ 10704-91) поставляются наружным диаметром 8–1620 мм, толщиной стенки 1–16 мм, длиной 2–10 м.

Электросварные круглые горячекатаные стальные трубы со спиральным швом (ГОСТ 8696-74) поставляются наружным диаметром 159–1420 мм, толщиной стенки 3,5–14,0 мм, длиной 10–12 м.

Водогазопроводные сварные стальные трубы (ГОСТ 3262-75) изготавливаются наружным диаметром 10,2–165,0 мм, толщиной стенки 1,8–5,5 мм, длиной 4–12 м.

Проволока применяется для изготовления пружин, тросов, канатов, электропроводов, электродов, сеток и других целей.

Круглая холоднотянутая проволока из стали и других сплавов (ГОСТ 2771-81) может быть диаметром 0,01–16,0 мм.

Низкоуглеродистая проволока общего назначения (ГОСТ 3282-74) изготавливается диаметром 0,16–10,0 мм, термически упрочненной и неупрочненной, светлой, черной и оцинкованной.

Среднеуглеродистая стальная проволока (ГОСТ 17305-71) выпускается диаметром 0,32–7,0 мм.

Периодический прокат имеет по длине переменное сечение. Этот вид проката широко применяется в качестве фасонной заготовки для последующей штамповки или механической обработки, позволяет снизить расход металла и себестоимость изготовления деталей. Периодический прокат получают путем горячей продольной или поперечно-винтовой прокатки. К профилям периодического проката относятся круглый и фасонный, листы переменного сечения, трубы с переменной величиной диаметра и толщиной стенки, арматура и другие.

Специальный прокат включает продукцию законченной формы – зубчатые колеса, венцы зубчатых колес, железнодорожные колеса, бандажи железнодорожных колес, шарики подшипников и др.

Индивидуальные задания

№ варианта	№ п/п	Наименование детали (дополнительные требования при эксплуатации или к материалу детали)	Твердость <i>HRC</i> , ( <i>HB</i> )	№ варианта	№ п/п	Наименование детали (дополнительные требования при эксплуатации или к материалу детали)	Твердость <i>HRC</i> , ( <i>HB</i> )
1	1	Палец поршневой	<i>HRC</i> 55–60	2	1	Ось	<i>HB</i> 260–300
	2	Рессора	<i>HRC</i> 40–45		2	Кольцо стопорное	<i>HRC</i> 35–40
	3	Шабер (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 61–63		3	Матрица (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 58–62
	4	Матрица (легированная сталь)	<i>HRC</i> 50–55		4	Метчик (легированная сталь)	<i>HRC</i> 58–62
	5	Внутреннее кольцо шарикового подшипника	<i>HRC</i> 58–62		5	Внутреннее кольцо роликового подшипника	<i>HRC</i> 58–62
3	1	Полуось	<i>HB</i> 300–360	4	1	Шестерня	<i>HRC</i> 45–50
	2	Зубило (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 58–60		2	Рессора	<i>HRC</i> 40–45
	3	Пружина	<i>HRC</i> 40–45		3	Скоба (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 58–62
	4	Сверло (легированная сталь)	<i>HRC</i> 58–60		4	Накатная плашка (легированная сталь)	<i>HRC</i> 56–58
	5	Ролик подшипника	<i>HRC</i> 58–62		5	Шарик подшипника	<i>HRC</i> 58–62

1	2	3	4	1	2	3	4
5	1	Фланец	HRC 30–35	6	1	Втулка	HRC 25–30
	2	Лезвия ножниц для холодной резки металла	HRC 55–57		2	Калибр-скоба (углеродистая сталь)	HRC 58–60
	3	Пружина	HRC 40–45		3	Напильник (углеродистая сталь)	HRC 61–63
	4	Строгальный резец	HRC 56–58		4	Фреза пальцевая	HRC 56–58
	5	Наружное кольцо игольчатого подшипника	HRC 58–62		5	Нож мясорубки	HRC 56–58
7	1	Шатун	HB 200–250	8	1	Болт шатуна	HB 250–300
	2	Пружина клапана	HRC 40–45		2	Рессора	HRC 45–50
	3	Стамеска (углеродистая сталь)	HRC 50–55		3	Пуансон (углеродистая сталь)	HRC 55–58
	4	Прошивной пуансон (легированная сталь)	HRC 54–55		4	Матрица (легированная сталь)	HRC 56–58
	5	Внутреннее кольцо роликового подшипника	HRC 58–62		5	Внутреннее кольцо шарикового подшипника	HRC 58–62
9	1	Шток	HB 300–350	10	1	Рычаг	HRC 35–40
	2	Пружина плоская	HRC 45–50		2	Пружина натяжная	HRC 40–45
	3	Пила (углеродистая сталь)	HRC 48–52		3	Калибр (углеродистая сталь)	HRC 60–62
	4	Фреза (легированная сталь)	HRC 58–62		4	Сверло (легированная сталь)	HRC 58–62
	5	Наружное кольцо шарикового подшипника	HRC 58–62		5	Шарик шарикового подшипника	HRC 58–62

1	2	3	4	1	2	3	4
11	1	Зубчатое колесо	HRC 50–55	12	1	Ось	HRC 40–45
	2	Рессора	HRC 40–45		2	Рессора	HRC 45–50
	3	Штамп вырубной (углеродистая сталь)	HRC 54–58		3	Скальпель (углеродистая сталь)	HRC 61–63
	4	Калибр (легированная сталь)	HRC 58–62		4	Пресс-форма (легированная сталь)	HRC 40–45
	5	Наружное кольцо шарикового подшипника	HRC 58–62		5	Внутреннее кольцо роликового подшипника	HRC 58–62
13	1	Шпиндель	HB 350–400	14	1	Вилка	HRC 35–45
	2	Пружина	HRC 40–45		2	Рессора	HRC 38–42
	3	Пробойник (углеродистая сталь)	HRC 50–55		3	Зенкер (углеродистая сталь)	HRC 61–63
	4	Нож гильотины (легированная сталь)	HRC 58–60		4	Гибочный штамп (легированная сталь)	HRC 56–58
	5	Наружное кольцо роликового подшипника	HRC 58–62		5	Ролик подшипника	HRC 58–62
15	1	Дисковая звездочка	HRC 30–40	16	1	Шестерня	HRC 45–50
	2	Кольцо стопорное	HRC 40–45		2	Пружина	HRC 40–45
	3	Эксцентрик (углеродистая сталь)	HRC 58–62		3	Развертка (углеродистая сталь)	HRC 58–60
	4	Фреза (легированная сталь)	HRC 58–62		4	Плашка (легированная сталь)	HRC 58–62
	5	Внутреннее кольцо шарикового подшипника	HRC 58–62		5	Наружное кольцо шарикового подшипника	HRC 58–62

1	2	3	4	1	2	3	4
17	1	Карданный вал	HRC 35–40	18	1	Рычаг	HRC 35–40
	2	Рессора	HRC 45–50		2	Фланец	HRC 25–30
	3	Напильник (углеродистая сталь)	HRC 61–63		3	Сегмент режущего аппарата жатки	HRC 55–60
	4	Развертка (легированная сталь)	HRC 58–62		4	Фреза (легированная сталь)	HRC 56–58
	5	Шарик подшипника	HRC 58–62		5	Рессора	HRC 40–45
19	1	Звенья приводной цепи	HRC 38–45	20	1	Храповик	HRC 25–30
	2	Шайбы гровера	HRC 35–40		2	Прямоугольного сечения пружина	HRC 40–45
	3	Матрица (легированная сталь)	HRC 50–55		3	Развертка (углеродистая сталь)	HRC 58–60
	4	Пуансон (углеродистая сталь)	HRC 55–60		4	Калибр (легированная сталь)	HRC 58–62
	5	Шпиндель	HRC 35–40		5	Ролик подшипника	HRC 58–62

## Общая характеристика основных видов термической обработки

Вид термической обработки	Температура нагрева, °C	Условия охлаждения	Назначение
<i>Отжиг I рода</i>			
Отжиг гомогенизационный	На 150–300 °C выше точки A <sub>c3</sub> , 1100–1150 °C. Продолжительность выдержки 8–15 ч	Медленное (с печью)	Для крупных фасонных отливок и слитков из легированной стали для получения однородной (гомогенной) структуры путем устранения (ослабления) дендритной ликвации. Для уменьшения возможности образования флокенов, шиферности, карбидной ликвации и других дефектов после обработки давлением и улучшения механических свойств фасонных отливок
Отжиг рекристаллизационный	Выше температуры начала рекристаллизации. Чаще 660–710 °C. Продолжительность выдержки 3–6 ч (масса садки до 2 т)	Медленное до 550 °C (под колпаком или фалем)	После холодной обработки давлением (калывка, прокатка, вытяжка, штамповка, волочение и т. д.) как межоперационная обработка для уменьшения твердости и увеличения пластичности, снятия наклепа
Отжиг, уменьшающий напряжения	200–700 °C	Медленное	Для снятия остаточных напряжений после литья, пластической деформации или механической обработки

Вид термической обработки	Температура нагрева, °С	Условия охлаждения	Назначение
<i>Отжиг II рода</i>			
Отжиг полный доэвтектоидной стали	На 30–50 °С выше точки $A_{c3}$	Медленное до 500 °С, чтобы обеспечить распад аустенита при небольшом переохлаждении, скорость охлаждения в зависимости от состава стали, величины и размера поковки колеблется от 15 до 150 °С, 1 ч	Для доэвтектоидных сталей с целью снижения твердости, улучшения обрабатываемости, снятия внутренних напряжений, устранения или уменьшения структурной неоднородности, измельчения зерна, подготовка стали к последующей термической обработке
Отжиг изотермический	На 30–50 °С выше точки $A_{c3}$ (для доэвтектоидной стали) или $A_{c1}$ (для заэвтектоидной стали)	Ускоренное до температуры наименьшей устойчивости аустенита в перлитной области (чаще 650–680 °С), выдержка при данной температуре для полного распада аустенита и последующее ускоренное охлаждение	Для ускорения отжига небольших заготовок проката или поволоки из легированной стали
Отжиг неполный	В интервале температур $A_{c1}$ и $A_{c3}$ ( $A_{c1}$ )	Медленное до 500–650 °С	То же для эвтектоидной стали

Вид термической обработки	Температура нагрева, °С	Условия охлаждения	Назначение
Отжиг сфероидизирующий (для сфероидизации цементита)	Несколько выше температуры $A_{c1}$	а) 30–40 °С в час до 600 °С и далее на воздухе; б) 20–30 °С в час до 680 °С, выдержка для выравнивания температуры и охлаждение до 600 °С с той же скоростью, дальнейшее охлаждение на воздухе	Для инструментальных сталей для снижения твердости, улучшения обрабатываемости резанием, подготовки структуры к окончательной термической обработке и устранения остаточных напряжений, а также для низкоуглеродистых сталей (листы, прутки) перед холодной штамповкой или волочением для повышения пластичности
<i>Нормализация</i>			
Нормализация (отжиг нормализационный)	На 50–60 °С выше точки $A_{c3}$ для доэвтектоидной или $A_{cm}$ для заэвтектоидной стали	На спокойном воздухе	Для получения мелкого зерна, равномерного распределения структурных составляющих, улучшения обрабатываемости низкоуглеродистой стали, устранения карбидной сетки в заэвтектоидной стали перед сфероидизацией, улучшения механических свойств, снижения порога хладноломкости
<i>Закалка</i>			
Непрерывная (в одном охлаждающем теле)	На 40–60 °С выше точки $A_{c3}$ для доэвтектоидной и точки $A_{c1}$ для заэвтектоидной стали или температуры растворения избыточных фаз	Чаще быстрое охлаждение (вода, масло и другие среды) для переохлаждения аустенита до мартенситной точки $M_n$ . Скорость охлаждения должна быть выше критической	Применяется в сочетании с отпуском для получения высокой твердости, износостойкости, а также для получения высокого комплекса механических свойств

Вид термической обработки	Температура нагрева, °С	Условия охлаждения	Назначение
Прерывистая (в двух средах)	То же	Сначала быстрое охлаждение в воде до температуры несколько выше $M_n$ с последующим более медленным охлаждением в масле. Выдержка в воде – ориентировочно 1 с на каждые 5–6 мм диаметра (толщины)	Для инструмента из углеродистой стали. Замедленное охлаждение в области температур образования мартенсита способствует уменьшению остаточных напряжений и деформаций
Ступенчатая	То же	В расплавленных солях, имеющих температуру несколько выше точки $M_n$ . Выдержка в расплавленных солях должна обеспечить выравнивание температуры по сечению изделий. Окончательное охлаждение на воздухе или в другой закалочной среде	Для закалки мелкого инструмента из углеродистой стали (У8, У10, У12, У13), более крупного из легированной (Х, 9ХВГ, ХВГН, ХС и др.) и быстрорежущей стали (Р18, Р12, Р9 и др.). Рекомендуется для уменьшения напряжений, деформаций (коробления) и устранения трещин
Изотермическая	То же	В расплавленных солях, имеющих температуру несколько выше точки $M_n$ (250–400 °С). Выдержка в солях должна обеспечить, возможно, более полный распад аустенита, чаще 20–40 мин	Наряду с минимальными деформациями для ряда конструкционных сталей (30ХГС, 30ХГСНМА и др.) обеспечивает высокую прочность и повышает сопротивление хрупкому разрушению (повышает сопротивление отрыву и работу распространения трещины). При изотермической закалке инструментальных сталей (6ХС, 5ХВС2, 9ХС, ХВГ и др.) на твердость $HRC$ 40–50 возрастают – пластичность, вязкость, предел выносливости и сопротивление износу

Вид термической обработки	Температура нагрева, °С	Условия охлаждения	Назначение
<i>Отпуск</i>			
Низкий	120–250 °С	Медленное или ускоренное охлаждение	Для снижения внутренних напряжений; сохранения высокой твердости и износостойкости при повышении сопротивления хрупкому разрушению. Для режущего и мерительного инструмента, после поверхностной индукционной закалки, после закалки цементированных изделий и т. д.
Средний	350–500 °С	То же	Для пружин и рессор. Обеспечивает высокий предел упругости.
Высокий	500–680 °С	Медленное или быстрое (масло, вода) для сталей, склонных к обратной отпускной хрупкости	Для получения максимальной вязкости при сохранении относительно высоких значений предела прочности и текучести и повышенного сопротивления хрупкому разрушению для получения минимальных внутренних напряжений

## Индивидуальные задания

№ варианта	Наименование детали	Марка стали	№ варианта	Наименование детали	Марка стали
1	Вал ступенчатый	20Х	11	Ротор насоса гидроусилителя	20ХГНТР
2	Кулачок	18ХГТ	12	Вал сошки руля	20Х2Н4А
3	Зубчатое колесо	25ХГМ	13	Винт рулевого управления	25ХГТ
4	Червяк редуктора	20	14	Вал первичный КПП	12ХН4А
5	Шаровые пальцы	20Х	15	Тяжелонагруженное зубчатое колесо	20ХГНР
6	Золотник	15Х	16	Шестерня ведущая КПП	25ХГТ
7	Шестерня ведомая	30ХГТ	17	Шестерня ведомая	18ХГТ
8	Шестерня полуоси	25ХГНМТ	18	Шестерня	20ХНР
9	Вал коробки передач	25ХГМ	19	Вал-шестерня	20ХН3А
10	Шестерня ведущего моста	19ХГН	20	Вал	12ХН3А

№ варианта	Наименование детали	Марка стали	№ варианта	Наименование детали	Марка стали
21	Направляющая	30Х3МФ	31	Зубчатое колесо	40ХФА
22	Колесо зубчатое	40ХФА	32	Вал гладкий	40Х
23	Коленчатый вал	45ХФ	33	Коленчатый вал	38ХН3ВА
24	Вал	50Г	34	Колесо зубчатое	40ХФА
25	Колесо зубчатое	40Х	35	Ось коромысла клапана	45
26	Игла форсунки	38Х2МЮА	36	Коленчатый вал	38ХН3ВА
27	Клапан	3Х13	37	Ходовой винт	40ХН2МА
28	Зубчатая муфта	50ХМ	38	Шток	40Х13
29	Гильза	30Х3МФ	39	Плунжер	38Х2МЮА
30	Плунжер	40Х13	40	Палец	3Х13

ДЛЯ ЗАМЕТОК

*Учебное издание*

**Кащевич Вячеслав Михайлович,  
Калиновский Виктор Рувимович,  
Толочко Николай Константинович и др.**

## СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Лабораторный практикум*

Ответственный за выпуск *В. М. Кащевич*  
Редактор *Т. В. Каркоцкая*  
Компьютерная верстка *Д. О. Хмелевская*

Подписано в печать 09.08.2011 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 8,36. Тираж 200 экз. Заказ 738.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010.  
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.  
Пр-т Независимости, 99-2, 220023, Минск.