

№ 32

В.К. Нарва

# **Технология порошковых материалов и изделий**

Курс лекций

**№ 32**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра порошковой металлургии и функциональных покрытий

В.К. Нарва

# **Технология порошковых материалов и изделий**

Курс лекций

Допущено учебно-методическим объединением  
по образованию в области металлургии в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению Металлургия



Москва 2012

УДК 621.762  
Н28

Рецензент  
канд. техн. наук, доц. *В.С. Челноков*

**Нарва, В.К.**

Н28      Технология порошковых материалов и изделий : курс лекций / В.К. Нарва. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2012. – 171 с.  
ISBN 978-5-87623-559-6

Рассмотрены вопросы формирования структуры и свойств порошковых материалов с особыми свойствами: пористых, антифрикционных, фрикционных, электротехнических. Описаны применяемые технологические схемы производства конструкционных материалов, методы повышения свойств за счет легирования основы, термической, химико-термической и термомеханической обработки. Оценены преимущества и недостатки метода порошковой металлургии применительно к материалам различного назначения.

Предназначен для студентов, обучающихся по специальностям 150108 «Порошковая металлургия, композиционные материалы, покрытия», 150701 «Физико-химия процессов и материалов», а также магистров, обучающихся по направлению «Металлургия».

**УДК 621.762**

ISBN 978-5-87623-559-6

© В.К. Нарва, 2012

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
<b>Раздел I. Пористые материалы</b> .....	7
1. Пористые подшипники .....	7
1.1. Физико-химические основы и технология производства пористых подшипников на железной и медной основе .....	7
1.2. Свойства пористых подшипников. Пути улучшения свойств. Области применения .....	19
2. Спеченные фильтры .....	32
2.1. Спеченные фильтры. Основные составы и материалы для фильтров .....	32
2.2. Технология приготовления фильтров. Свойства фильтров .....	38
2.3. Особенности производства однослойных и многослойных фильтров .....	44
2.4. Другие виды пористых материалов и изделий. Особенности технологии, свойства, области применения .....	49
<b>Раздел II. Материалы для узлов трения</b> .....	56
3. Антифрикционные материалы .....	56
3.1. Принципы работы антифрикционных материалов. Основы современной теории трения .....	56
3.2. Физико-механические свойства твердых смазок. Технология изготовления, свойства и области применения антифрикционных материалов .....	63
3.3. Особенности работы и составы антифрикционных материалов для экстремальных условий .....	71
4. Фрикционные материалы .....	77
4.1. Требования к фрикционным материалам. Теоретические основы процессов трения и износа фрикционных материалов .....	77
4.2. Влияние компонентов на свойства фрикционных материалов .....	90
4.3. Технология получения, свойства, области применения фрикционных материалов .....	103
4.4. Фрикционные материалы для особых условий работы. Особенности составов, свойства .....	109
<b>Раздел III. Электротехнические материалы</b> .....	113
5. Электроконтактные материалы .....	113
5.1. Особенности работы и виды износа разрывных электроконтактов. Основные составы .....	113

5.2. Физико-химические основы и технология производства разрывных электроконтактов. Основные свойства и направления развития .....	120
5.3. Скользящие электроконтакты. Технологические особенности производства, свойства, области применения.....	126
6. Магнитные материалы .....	136
6.1. Составы, технология производства и свойства магнитомягких спеченных материалов. Области применения .....	137
6.2. Особенности свойств, технология и составы магнитотвердых спеченных материалов. Области применения .....	140
6.3. Ферриты. Технологические варианты получения, составы, свойства, области применения .....	148
6.4. Магнитодиэлектрики. Структура, основные составы, свойства, области применения.....	161
6.5. Магнитодиэлектрики для различных отраслей техники. Особенности технологии. Составы компонентов, свойства .....	165
Заключение.....	169
Библиографический список.....	170

## ВВЕДЕНИЕ

Характерными тенденциями в современном машиностроении являются стремление к созданию новых машин и механизмов с высокими рабочими параметрами и поиски наиболее экономных высокопроизводительных методов производства. На эти направления все большее влияние оказывает развитие порошковой металлургии.

Создание новых машин зависит от наличия и темпов изыскания новых материалов со специальными свойствами (жаропрочных, коррозионно-стойких, магнитных, антифрикционных, контактных, фрикционных и др.). Дальнейшее повышение нагрузок и скоростей работы машин, усложнение температурных условий и характера рабочих сред возможны только при применении новых материалов. В изготовлении таких материалов порошковая металлургия играет доминирующую роль.

Развитие новой техники, особенно самолето- и ракетостроения, автомобилестроения, атомной и других видов энергетики, будет способствовать разработке новых материалов и тормозиться их отсутствием. Порошковая металлургия – наиболее экономичный метод изготовления изделий; отходы материалов здесь самые низкие по сравнению со всеми известными методами производства (литьем, механической холодной и горячей обработкой), а количество операций – минимально. Эти особенности процессов порошковой металлургии определяют ее как прогрессивный метод производства с большими перспективами дальнейшего развития.

Материалы, производимые методом порошковой металлургии, по назначению делятся на две основные группы. К первой относятся материалы общего назначения, заменяющие обычные углеродистые и легированные стали, чугуны, цветные сплавы, т.е. наиболее распространенные, используемые в машиностроении и приборостроении. Их применение позволяет упростить технологию изготовления деталей, снизить трудоемкость и себестоимость и, следовательно, экономически выгодно.

Вторую группу составляют материалы, характеризующиеся специальными свойствами – высокой прочностью и пластичностью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, твердостью, жаропрочностью, регламентированными физическими характеристиками, например малой или большой плотностью, заданными магнитными и электрическими свойствами. К этой группе относятся пористые, ан-

тифрикционные, фрикционные, электротехнические, жаропрочные, инструментальные материалы.

Каждый из перечисленных видов материалов, полученных методом порошковой металлургии, характеризуется особыми эксплуатационными и физико-механическими свойствами, часто недостижимыми при использовании других технологических вариантов получения.

Рассмотрению вопросов технологии и свойств порошковых пористых, антифрикционных, фрикционных и электротехнических материалов посвящен данный курс лекций.

# **РАЗДЕЛ I. ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

## **1. ПОРИСТЫЕ ПОДШИПНИКИ**

### **1.1. Физико-химические основы и технология производства пористых подшипников на железной и медной основе**

#### **Общая характеристика пористых подшипников**

Развитие машиностроения и транспорта, авиа- и автомобилестроения требует создания новых надежных антифрикционных материалов для узлов трения. Созданием пористых подшипников методом порошковой металлургии удалось решить важную задачу обеспечения народного хозяйства антифрикционными изделиями.

Пористые спеченные подшипники пришли на смену литым антифрикционным сплавам типа баббитов, бронз. Однако, несмотря на хорошие антифрикционные свойства таких сплавов, изготовленные из них подшипники из-за наличия в их составе ценных цветных металлов, таких как олово, свинец, сурьма, отличались высокой стоимостью.

Широкое применение пористых подшипников обусловлено их уникальными свойствами и преимуществами перед литыми подшипниками:

- а) самосмазываемостью;
- б) высокой способностью к прирабатываемости;
- в) возможностью использования недефицитных материалов;
- г) дешевизной;
- д) бесшумностью работы.

Эти материалы успешно конкурируют с традиционными литыми антифрикционными материалами типа бронз и баббитов, благодаря тому, что остаточная пористость (25...35 %) в их структуре играет роль резервуара жидкой смазки, а графит служит источником сухой смазки. Пористые подшипники способны удерживать значительное количество смазки, иногда достаточное для многолетней эксплуатации, и предназначены для условий, когда подача масла затруднена, невозможна или ненадежна.

Производство пористых подшипников отличается простотой технологии, высокой производительностью и большой точностью. Сокращение механической обработки и повышение производительности

сти труда дает возможность на одних и тех же площадях увеличить производственную программу, уменьшить парк станочного оборудования и сократить число рабочих. Применение их в промышленности дает большую экономию цветных металлов, позволяет упростить технологию изготовления подшипников и уменьшить отходы производства. К недостаткам пористых спеченных подшипников следует отнести ограниченную возможность применения их в тяжело нагруженных узлах, особенно там, где работа подшипника связана с ударными нагрузками.

Первые сообщения об изготовлении пористых спеченных подшипников появились в 1922 г., когда американской электрической компанией был изготовлен бронзографитовый сплав.

В Советском Союзе в 1932 г. в Ленинградском политехническом институте М.П. Славинским и А.С. Тумаревым были получены первые отечественные пористые пропитываемые маслом изделия из порошков оловянистой бронзы и графита. В дальнейшем с 1933 г. начался промышленный выпуск отечественных спеченных антифрикционных пористых изделий. В настоящее время пористые антифрикционные материалы изготавливаются в больших количествах на многих заводах.

Промышленностью выпускается много сортов и типов подшипников. Основные группы материалов подшипников:

- 1) пористое железо;
- 2) железографитовая композиция (1...3 % С);
- 3) бронзовые и бронзографитовые материалы: 67...90 % Cu, 9...10 % Sn, 0...4 % С;
- 4) железо–медь, железо–медь–углерод, содержащие 3...15 % Cu, до 2 % С, остальное – Fe;
- 5) специальная бронза.

### **Технология изготовления пористых подшипников из материалов на основе железа**

Технология изготовления пористых спеченных антифрикционных изделий не имеет существенных отличий от общей технологии изготовления спеченных материалов и состоит из следующих этапов: приготовление шихты, прессование, спекание, пропитывание маслом, калибровка, контроль.

На рис. 1.1 приведена принципиальная схема производства железо–медь–графитовых пористых подшипников [1].

Для приготовления шихты при изготовлении пористых подшипников можно использовать порошок железа, полученный любым известным способом. Однако при выборе порошка в первую очередь руководствуются экономическими соображениями с учетом его технологических свойств. Медь используют электролитическую (МЦТУ 4451–54), графит – карандашный (ГОСТ 4404–58), иногда – чешуйчатый марки АЗ и ЭАТ или пластинчатый марки КЛЗ-1. Перед использованием металлические порошки подвергают длительному отжигу. Для удаления влаги и летучих соединений графитовый порошок прокаливают при температуре 850...1000 °С в течение 1...2 ч в защитной атмосфере.

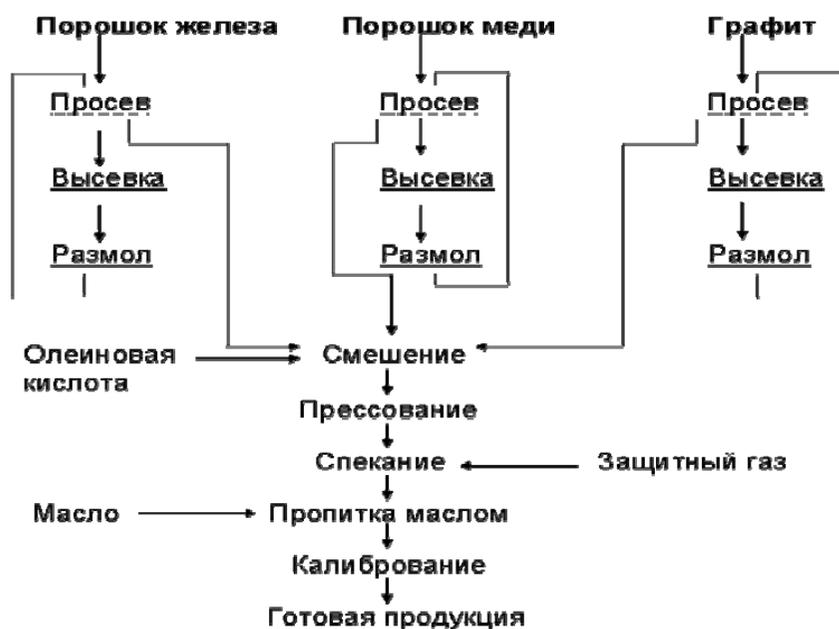


Рис. 1.1. Технологическая схема производства пористых железо-медь-графитовых подшипников

Восстановленный железный, медный порошки и прокаленный графит просеивают через сита № 025-018, после чего в определенном соотношении смешивают. Наиболее часто смешивание осуществляют в конусных смесителях в течение 4 ч.

При сухом смешивании трудно достигнуть высокой однородности смеси, происходит сильное пыление материалов, поэтому на практи-

ке производят увлажненное смешивание: добавляют 1...2 % бензина, машинного масла или олеиновой кислоты из расчета  $0,5 \text{ см}^3$  на 100 г шихты. Добавка машинного масла и олеиновой кислоты в то же время благоприятно влияет на процесс прессования шихты, но при этом ухудшается текучесть. Поэтому при прессовании шихты на прессах-автоматах, где производится объемная дозировка материала и требуется высокая текучесть, в шихту добавляют порошкообразный стеарат цинка в количестве 0,5...1 %. Шихту прессуют в стальных пресс-формах при давлении 300...800 МПа в зависимости от требуемой пористости. Введение в шихту масла снижает давление прессования до 200...400 МПа. Пористость спрессованных подшипников составляет 25...35 %.

Спекание пористых втулок может осуществляться в печах любого типа с обязательным применением защитных атмосфер для защиты материалов от окисления. В качестве защитных атмосфер используют водород, диссоциированный аммиак, конвертируемый природный газ. В ряде случаев спекание изделий проводят в углеродсодержащей засыпке.

При спекании в конвейерных печах с газовой защитной средой заготовки укладывают на поддоны из жаропрочной стали, которые подаются с определенной скоростью навстречу подаваемому газу. Температура спекания изделий в конвейерных печах 1050...1100 °С. Подача газа по окончании спекания прекращается при охлаждении втулок до температуры не выше 150...200 °С, иначе изделия могут окислиться.

При применении углеродсодержащих засыпок заготовки укладывают в специальные коробки или тигли из жаропрочной стали и пересыпают древесным углем или графитом. Сверху коробки закрывают крышкой и обмазывают огнеупорной глиной. Коробки загружают в разогретую до 600...650 °С печь, нагревают до температуры спекания (1070 °С), выдерживают 4...6 ч, затем вынимают из печи и охлаждают на воздухе. Распаковку коробок производят при температуре не выше 50...60 °С.

Контроль спеченных пористых изделий производится по микроструктуре, плотности и твердости. Форма и размер пор контролируются по микроструктуре. Металлическая основа структуры втулок в зависимости от состава шихты и технологии изготовления может быть ферритной, ферритно-перлитной, перлитной или перлитно-цементитной.

Изучением физико-химических закономерностей структурообразования железуглистых материалов при спекании занимались многие исследователи. В.И. Лихтман и И.Н. Смирнова предполагают разделять весь процесс спекания смесей Fe–C на три стадии [1]:

1) собственно спекание, при котором определяют оптимальную температуру и время спекания;

2) параллельно со спеканием: образование аустенита и диффузия C в аустенит. Насыщение аустенита углеродом происходит за счет контакта частиц Fe и C, а также за счет газовой фазы. Концентрация C в аустените поэтому не одинакова по всему объему прессовки: максимальное насыщение вблизи графитовых включений, в месте контакта Fe и C возможно образование цементита. Таким образом, в спеченном изделии может быть весь спектр структур: от феррита до цементита, т.е. неоднородный аустенит;

3) распад аустенита при охлаждении и образование той или иной структуры в зависимости от концентрации C и скорости охлаждения. Это решающий процесс в структурообразовании и он значительно влияет на свойства изделия. Если при спекании образовался структурно-свободный цементит, то для его разложения необходимо дать выдержку в зоне эвтектоидной температуры. При этом в зависимости от длительности выдержки можно ожидать исчезновения только структурно-свободного цементита с сохранением перлитной или перлитно-ферритной структуры, либо полного разложения цементита перлита с образованием ферритной структуры. Скорость охлаждения оказывает существенное влияние на процесс формирования структуры Fe–C материалов, регулируя которую можно подавлять процесс графитизации или снижать содержание цементита в структуре.

Таким образом, спекание Fe–C материалов может протекать так, что в результате получится пористая масса с различным содержанием углерода:

а) не содержащая C в связанном состоянии, т.е. обладающая ферритной структурой (C в этом случае заполняет поры изделия);

б) имеющая в своем составе до 0,9 %  $C_{\text{связ}}$ , т.е. обладающая ферритно-перлитной структурой (0,2...0,5 %  $C_{\text{своб}}$ );

в) имеющая ферритно-перлитную структуру, причем одна часть C находится в связанном состоянии в виде структурно-свободного цементита, а другая – в свободном состоянии.

Сравнение различных структур показывает, что для антифрикционных деталей нежелательно наличия в структуре свободного цементита. Изучение физико-химических основ процесса спекания Fe–C

материалов легло в основу выбора практического режима их спекания: быстрый нагрев до 700...800 °С с выдержкой при этой температуре 20...30 мин, подъем температуры до 1100...1200 °С с выдержкой 1 ч, охлаждение в холодильнике печи до 800...900 °С с последующим охлаждением до температуры, необходимой для формирования той или иной структуры.

Присадка меди (3...10 %) к Fe–С композициям благоприятно влияет как на технологию изготовления, так и на свойства изделий: улучшает прессуемость и прочностные свойства брикетов, а также стабилизирует размеры изделий при спекании, вызывая увеличение размеров изделий и компенсируя противоположное действие усадки, стремящейся их сократить.

Железомедные сплавы – сплавы с ограниченной взаимной растворимостью. Растворимость меди в  $\alpha$ -Fe изменяется от 3,5 до 0,35 % при понижении температуры от 830 °С до комнатной. Это дисперсионно-твердеющие сплавы.

На рис. 1.2 приведена диаграмма состояния Fe–Cu [2, 3].

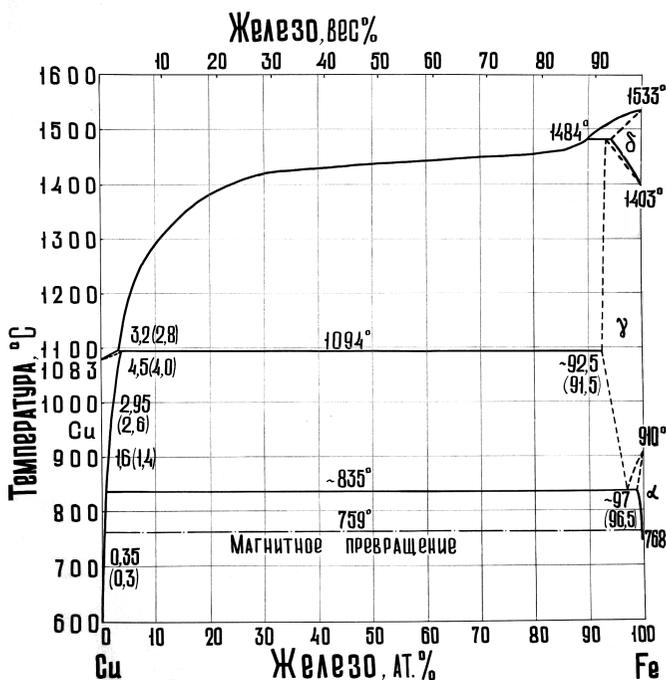


Рис. 1.2. Фазовая диаграмма системы Fe–Cu

При нагреве смеси железа с 5...10 % меди от комнатной температуры до температуры спекания (1200 °С) в восстановительной атмосфере происходят следующие явления. При нагреве выше 600 °С медь начинает диффундировать в железо, а железо – в медь. Эти диффузионные процессы протекают до температуры плавления меди 1083 °С. При этом происходит также сопровождающийся усадкой процесс спекания (особенно выше 800 °С). Следует помнить, что  $\alpha$ -Fe спекается быстрее, чем  $\gamma$ -Fe, поэтому чем больше выдержка при температуре ниже 910 °С, тем больше доля усадки за счет спекания  $\alpha$ -Fe.

При температуре плавления меди (или сплава, образующегося в результате диффузии) возрастает подвижность частиц, жидкая фаза, хорошо смачивающая железо, проникает между частицами. Одновременно при повышении температуры до 1200 °С медь начинает быстро диффундировать в  $\gamma$ -Fe. В большинстве случаев промышленного спекания медь диффундирует в железо почти до конца. В результате диффузии меди в железо размер частиц железа увеличивается, что приводит к росту брикета, диффузия меди в железо – основная причина роста Fe–Cu брикетов. Максимальный рост брикетов у сплавов с 8 % Cu, т.е. при предельной растворимости меди в Fe при 1100...1200 °С.

Рост брикета можно компенсировать его усадкой в результате спекания. Величина усадки будет зависеть от активности порошка Fe, наличия любых условий, активирующих спекание, степени развития объемной диффузии. Общее изменение размеров брикета определяется суммарным влиянием факторов, вызывающих рост и усадку.

Материалы Fe–Cu–C можно упрочнить дисперсионным твердением. Для протекания процесса дисперсионного твердения нужно предварительно получить пересыщенный твердый раствор. Это часто достигается закалкой (быстрым охлаждением из области однофазного твердого раствора). Путем получения пересыщенного твердого раствора и последующего его распада при старении может быть достигнуто упрочнение сплавов.

Пугина Л.И. [1] отмечает, что в пределах содержания Cu до 5...7 % обнаружить ее в структуре сплавов трудно. Добавление Cu более 7 % вызывает выделение медистой составляющей по границам зерен, что может служить причиной снижения прочности. Пропитка производится машинным жидкотекучим маслом марок МГ, С, СВ в баках, заполненных маслом, подогретым до 100...120 °С в течение 1 ч.

На масловпитываемость большое влияние оказывает число открытых пор, крупность частиц исходных порошков и крупность пор спеченных изделий. С увеличением числа открытых пор и уменьшением их размеров масловпитываемость повышается. Обычно объем пор, которые могут быть заполнены маслом, составляет 80...90 % от всех пор изделия.

Лучшие результаты получаются при пропитывании в вакууме. В этом случае содержание масла в порах увеличивается на 25...27 %, а время пропитывания сокращается в несколько раз (8–10).

Схема вакуумной установки для пропитки пористых изделий маслом приведена на рис. 1.3. Хорошие результаты при пропитке дает применение ультразвука, который способствует проникновению жидкости в поры. При использовании ультразвука пропитка при 18...20 °С происходит в несколько раз быстрее, чем при других способах.

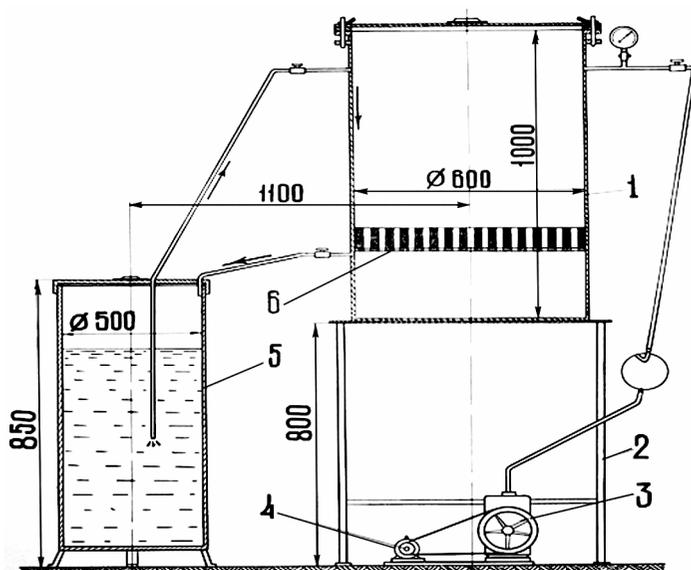


Рис. 1.3. Установка для пропитки маслом пористых изделий в вакууме: 1 – камера пропитки; 2 – подставка; 3 – вакуумный насос; 4 – электропривод; 5 – емкость с маслом; 6 – пористая перегородка

Коэффициент заполнения пор маслом определяется по формуле:

$$K = \frac{10^4 m_M}{\gamma_M V_{II}}$$

где  $m_m$  – масса масла во втулке, г;

$\gamma_m$  – плотность масла, г/см<sup>3</sup>;

$V$  – объем втулки, см<sup>3</sup>;

$\Pi$  – пористость втулки, %.

Коэффициент  $K$  должен быть не ниже 75 % для втулок с пористостью до 20 % и не ниже 95 % для втулок с пористостью более 25 %. Масловпитываемость изделия проверяется по увеличению массы и обычно составляет 2...4 % от массы изделия.

Весовая масловпитываемость определяется по формуле

$$M_{\text{вес}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100,$$

а объемная масловпитываемость

$$M_{\text{об}} = \frac{M_{\text{вес}}}{\gamma_m},$$

где  $m_1$  – масса до пропитки, г;

$m_2$  – масса после пропитки, г.

Существует верхний предел пористости спеченного материала, выше которого материал становится конструктивно непрочным. Нижний предел обусловлен тем, что при малой пористости отдельные поры становятся изолированными, т.е. несообщающимися. Указанные пределы лежат между 50 и 10 % пор по объему. Для большей части подшипниковых материалов пористость обычно составляет 25...35 %. Практически возможно заполнение маслом на 90 % или более.

Практически пропитка маслом облегчается путем применения горячего масла, разрежения или давления. В случае разрежения корзины опускают в вакуумную камеру при остаточном давлении 66,5 Па (0,5 мм рт. ст.). При этом удаляется основная часть влаги и воздуха. Сразу же после этого в камеру выпускают масло, а затем атмосферный воздух. Иногда давление воздуха достигает  $3 \cdot 10^3$  кПа (30 атм). Использование вакуума или давления сокращает общее время обработки. Пропитанные маслом втулки поступают на калибровку.

Калибровка необходима для придания изделию окончательных размеров и выравнивания плотности по сечению. Она осуществляется на механических прессах. Для этой операции используются пресс-формы с обжатием по высоте и диаметру.

При калибровке размеры втулок могут быть выдержаны в пределах 2 и 3 кл. точности с чистой поверхностью, соответствующей 10–11 кл., что позволяет в дальнейшем не проводить никакой механической обработки. Калибровка способствует улучшению физико-механических свойств изделий за счет упрочнения деталей, в первую очередь, поверхностных слоев.

Существует несколько способов калибровки:

- а) по наружной поверхности;
- б) по внутренней поверхности;
- в) по наружной и внутренней поверхностям; он имеет две разновидности – на проход с выталкиванием детали вниз и с выталкиванием детали вверх.

Давление при калибровке обычно не превышает 30...40 % от давления прессования  $p_{пр}$ . Для снижения  $p_{пр}$  при калибровке и уменьшения износа матрицы калибровочной пресс-формы втулки перед калиброванием пропитывают маслом.

В настоящее время предложена новая схема калибровки по наружному и внутреннему диаметрам одновременно с использованием самоустанавливающегося (плавающего) пуансона (рис. 1.4) [1].

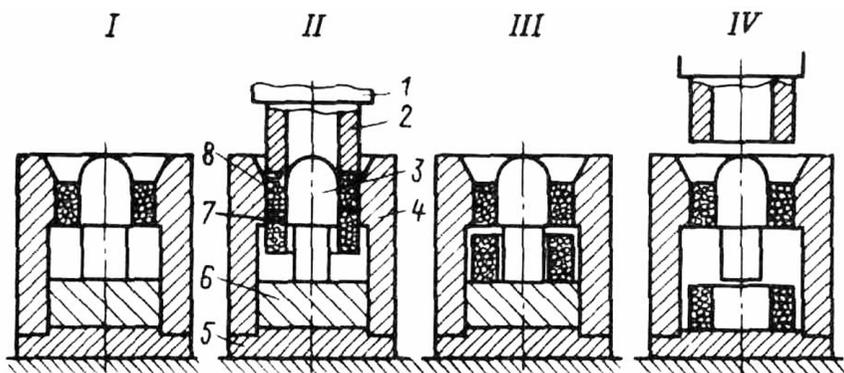


Рис. 1.4. Схема калибрующей пресс-формы: I–IV – циклы калибровки;  
 1 – пуансонодержатель; 2 – верхний пуансон;  
 3 – калибрующий пуансон; 4 – матрица; 5 – подставка;  
 6 – плита; 7, 8 – калибруемые детали

*Бронзографитовые подшипники.* Спеченные пористые материалы на медной основе представляют собой главным образом оловянистые и оловянисто-свинцовистые бронзы. В некоторых случаях применяются бронзы с 1...5 % графита.