

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ 3 ДИСЦИПЛИНЫ**  
**«Структуроутворення та властивості трибологічних металевих**  
**матеріалів»**  
**(гр. МВ-01-15М, 4 чверть)**

*Фрикционные материалы*

В отличие от антифрикционных, фрикционные материалы должны обладать высоким и стабильным коэффициентом трения, достаточной износостойкостью, прочностью, устойчивостью к температурным скачкам, воздействию абразива и агрессивных сред. В частности, материалы тормозов и фрикционных муфт должны обеспечивать плавное срабатывание системы без автофрикционных колебаний, проявляющихся в форме скрипа при торможении, или пробуксовки и обеспечивать высокий срок службы. При торможении вся кинетическая энергия транспортного средства в тормозах рассеивается в тепло. Поэтому в момент торможения температура трущихся поверхностей, например, в тормозе самолетов, достигает 1200°C, а в объеме тормозной накладки до 600°C. В тормозах автомобилей эти температуры соответственно могут достигать 400°C и 200°C.

Для изготовления ряда элементов наиболее нагруженных фрикционных устройств - тормозов и муфт сцепления - применяются материалы, получаемые методом порошковой металлургии. Наибольшее распространение получили материалы на основе железа и меди. Состав материалов на основе железа приведен в таблице 1.

Таблица 1

Состав фрикционных порошковых материалов на железной основе

Марка материала	Массовая доля, %					
	Fe	Cu	Ni	Графит	SiO <sub>2</sub>	Асбест
ФМК - 8	45	-	25	7	-	-
ФМК - 11	64	15	-	9	3	3
МКВ - 50А	64	10	-	8	-	3
СМК - 80	48	23	-	-	-	-

Первые три материала разработаны для тяжело нагруженных тормозов и муфт самолетов и военной техники. Материал СМК-80 применяется в тормозах и муфтах сцепления большегрузных автомобилей - карьерных самосвалов грузоподъемностью более 65 т.

Спеченные материалы на основе меди также широко используются в тяжелых транспортных средствах. В автомобильном и тракторостроении из этих материалов изготавливают тормозные диски, колодки и накладки для муфт сцепления.

В табл. 2 приведены данные о составе фрикционных материалов на медной основе.

Таблица 2.

Состав фрикционных порошковых материалов на медной основе

Массовая доля, %							Другие добавки, %
Cu	Sn	Pb	Fe	Графит	Асбест	SiO <sub>2</sub>	
68÷76	8÷10	7÷9	3÷5	6÷8	-	-	- Ti, V, Si, 6MoS <sub>2</sub> , 2÷10As 40 стеклянного волокна, 10 сульфида Al до 2Ni 0,75Si, 6Zn
60÷75	6÷10	20	5	1÷8	-	-	
18	2	3	3	3	30	-	
68÷86	5÷10	5÷15	2	4÷8	3	3	
75	8	5	4	1÷20	-	-	

Порошковая технология позволяет получать фрикционные материалы с заданными свойствами. Для автомобилей малой и средней грузоподъемности и для сельскохозяйственных и промышленных тракторов малой и средней мощности обычно используются фрикционные материалы на полимерной основе. Они применяются также в сельскохозяйственном и дорожно-строительном машиностроении, в буровой технике и т.д.

Как правило, в состав материалов входит 3 компонента:

теплостойкий армирующий материал с прочными волокнами, например, асбест (15÷16%);

теплостойкие с высоким и стабильным коэффициентом трения порошкообразные наполнители неорганического происхождения (20÷60%);

полимерное связующее: натуральные и синтетические каучуки, синтетические смолы (15÷30%) с вулканизационными агентами или отвердителями, ускорителями и активаторами вулканизации или отверждения.

Наиболее распространенным армирующим элементом является уникальный природный минерал, добываемый открытым методом - асбест. Элементарные волокна асбеста имеют вид трубок с наружным диаметром около 32 нм и внутренним - 2,6 нм, т.е. в поперечном направлении волокно имеет размеры, характерные для коллоидно-дисперсных материалов. Элементарные волокна упакованы в пряди диаметром от нескольких десятков до сотен микрометров. В прядях волокна удерживаются силами межмолекулярного притяжения. Средняя длина волокна составляет 1÷3 мм. По своей химической природе асбест является водным силикатом магния. Волокна асбеста обладают высокой прочностью на растяжение (до 3 ГПа), много превышающей прочность стали. Полости волокон частично или полностью заполнены водой, которая образует на внутренней поверхности практически мономолекулярный слой, поэтому она проявляет свойства иные, чем обычная влага, удаляясь лишь при температуре выше 425°C. Вид кристаллической решетки этого материала достоверно не установлен. Асбест обладает высоким коэффициентом трения (до 0,8), который слабо меняется в зависимости от температуры. То же можно сказать о прочности волокон, которая при нагревании до 400°C снижается всего на 20%. Лишь при 800°C наблюдается разрушение волокнистой структуры. Таким образом, асбест как будто специально создан как основа для фрикционного материала. Однако у асбеста имеется и существенный недостаток. Он считается экологически опасным материалом. Во многих странах запрещено использование асбеста в строительстве, электротехнике и других отраслях. Такие же тенденции наблюдаются и в производстве тормозных материалов, но найти эффективную замену асбесту пока не удалось. Имеются попытки заменить асбест волокнами из стекла, базальта, шлака, бора, углерода, но эти материалы еще не дали такого же эффекта, как асбест. В частности, нет такого материала, который так же, как асбест, очищал бы поверхность металлического контртела и при этом поглощал и связывал продукты изнашивания, не говоря о других качествах. Поэтому асбест пока сохраняет заслуженное лидерство среди компонентов фрикционных материалов.

Наполнителями асбестовых материалов служат железный сурик, баритовый концентрат, окислы хрома и других металлов. Добавляются также порошкообразный кокс, графит, технический углерод. Для повышения теплопроводности вводятся порошки и стружка из меди, латуни, цинка, алюминия, железа и т.д.

Связующими являются натуральные и искусственные каучуки и смолы, а также их комбинации. Одновременно вводятся вулканизаторы и отвердители.

Изделия на каучуковой основе обладают достаточно высоким коэффициентом трения и износостойкостью. Однако при повышении температуры выше 200 ÷ 250 °C коэффициент трения и износостойкость заметно снижаются.

Изделия на смоляной основе имеют большую теплостойкость, но обладают нестабильным коэффициентом трения, хрупкостью. Поэтому наилучший результат

достигается при совместном использовании смол и каучуков. Неудачное сочетание связующих из-за нестабильности коэффициента трения приводит к возникновению автофрикционных колебаний (скрип и визг тормозов).

Фрикционные муфты и тормоза являются весьма ответственными узлами, поскольку определяют безопасность эксплуатации транспортных средств, поэтому при их разработке производится весьма точный и детальный расчет. Изготавливаются опытные образцы, которые проходят сначала лабораторные, затем стендовые и натурные испытания. Особо тщательно обрабатываются новые тормозные материалы, подвергающиеся длительным испытаниям по специальным методикам.

По способу изготовления фрикционные материалы на полимерной основе делятся на 4 группы: формованные (прессованные) материалы (колодки, накладки, секторы, пластины, вкладыши); вальцованные (ленты и накладки); тканые (ленты, накладки); картонно-латексные (накладки). Номенклатура и характеристики фрикционных и антифрикционных материалов очень обширна и содержится в справочной литературе.

### Применение фрикционных материалов

Фрикционные материалы применяются в тормозах и механизмах плавной передачи вращения трением. Их основная особенность – высокий коэффициент трения.

#### *Тормозные тканые асбестовые ленты (ГОСТ 1198-93)*

Используются в качестве накладок в тормозных и фрикционных узлах машин и механизмов с поверхностной температурой трения до 300°C. Ширина лент-13-200 мм, толщина – 4-12 мм, длина – до 50 м. В зависимости от пропитки и назначения асбестовые тормозные ленты делятся на три типа:

- ЛАТ-1 (с масляно-смоляной пропиткой) – для малонагруженных тормозных механизмов различных кранов и других тормозных и фрикционных устройств, работающих при давлении до  $113 \cdot 10^4$  Па (11,5 кгс/см<sup>2</sup>);
- ЛАТ-2 (с масляной пропиткой) – для тормозных механизмов тракторов, автомашин, комбайнов, работающих при давлении до  $490 \cdot 10^4$  Па (50 кгс/см<sup>2</sup>);
- ЛАТ-3 (с каучуковой пропиткой) – для тормозных узлов якорно-швартовых судовых механизмов, работающих при давлении до  $1180 \cdot 10^4$  Па (120 кгс/см<sup>2</sup>).

Коэффициент трения асбестовых лент составляет: по стали – 0,3-0,5, по чугуну – до 0,41; плотность – 1,2 – 1,65 г/см<sup>3</sup>.

#### *Асбестовые эластичные материалы (ГОСТ 15960-96)*

Предназначены для тормозных узлов, работающих при поверхностной температуре трения до 200°C без масла. Они выпускаются в виде вальцованных лент трех марок:

- ЭМ-1 – для тормозных и фрикционных узлов строительного-дорожного и подъемно-транспортного оборудования, прессов и других машин, работающих при давлении до  $147 \cdot 10^4$  Па (15 кгс/см<sup>2</sup>);
- ЭМ-2 – для тормозных узлов тракторов, сельскохозяйственных и других машин, работающих при давлении до  $245 \cdot 10^4$  Па (25 кгс/см<sup>2</sup>);
- ЭМ-3 – для тормозных узлов мотороллеров и мотоциклов, работающих при давлении<sup>TM</sup> до  $79 \cdot 10^4$  Па; (8 кгс/см<sup>2</sup>).

Эластичность лент проверяется путем их изгиба на  $180^\circ$  вокруг круглой оправки с диаметром, равным 40 толщинам испытуемой ленты. Плотность лент – 2- 2,25 г/см<sup>3</sup>, коэффициент трения по стали – 0,4-0,44.

Для узлов трения автомобилей, самолетов, тракторов, металлорежущих и текстильных станков, подъемнотранспортного оборудования и тепловозов выпускаются фрикционные асбестовые накладки (ГОСТ 1786-95) – формованные, прессованные, тканые, картонно-бакелитовые и спирально навитые. Они могут эксплуатироваться во всех климатических зонах. Стандарт предусматривает 168 типоразмеров накладок. В нем приведены их наружные и внутренние диаметры, толщина, допустимые температуры при длительной и кратковременной эксплуатации, передаваемый крутящий момент, допустимая частота вращения, удельное давление. Твердость накладок – 170-360 НВ, коэффициент трения по чугуну -0,28- 0,55, линейный износ по чугуну – 0,88- 0,22 мм, теплостойкость – до  $(167-480) \times 10^6$  Па (17- 49 кгс/мм<sup>2</sup>), увеличение массы в жидких средах (вода, масло) – до 1%. Накладки обозначаются десятизначным номером, например: 25 7111 5602 – для демпфера руля, 25 7112 4317 – для фрикциона лущильного станка, 25 7113 1164 – для предохранительной муфты. Ресурс накладок, работающих в узлах трения, достаточно высок. Например, для автомобилей с дизелями он составляет 6 тыс. моточасов, легковых автомобилей – 125 тыс. км, грузовых автомобилей – 75 тыс. км при эксплуатации на дорогах первой категории (для дорог второй категории ресурс снижается на 20%, третьей категории – на 40%).

*Фрикционные материалы, получаемые методом порошковой металлургии  
(металлокерамические)*

Порошковые материалы изготавливают путем прессования металлических порошков в изделия необходимой формы и размеров и последующего спекания сформованных изделий в вакууме или защитной атмосфере при температуре 0,75-0,8 Тпл.

Спеченные материалы на основе железа и меди используют для фрикционных изделий (дисков, сегментов) в тормозных узлах. Фрикционные изделия должны иметь высокий коэффициент трения, достаточную механическую прочность и хорошее сопротивление износу. Для повышения коэффициента трения в состав фрикционных материалов вводят карбиды кремния, бора, тугоплавкие оксиды и т.д. Компонентами твердого смазочного материала служат графит, свинец, сульфиды и др.

Коэффициент трения по чугуну (трение без смазочного материала) для материала на железной основе составляет 0,18-0,40, а на медной основе – 0,17-0,25.

Фрикционные сплавы на медной основе применяют для условий жидкостного трения в паре с закаленными стальными деталями (сегменты, диски сцепления и т.д.) при давлении до 400 Мпа и скорости скольжения до 40 м/с с максимальной температурой 300-350<sup>0</sup>С. Такие материалы обладают высокими фрикционными свойствами, имеют высокий коэффициент трения, хорошую износостойкость и теплостойкость. Применяются в узлах трения самолетов, автомобилей, тракторов, металлорежущих станков и других машин и оборудования. Металлокерамические фрикционные материалы могут работать в узлах сухого трения и в масле.

Для работы в условиях трения без смазочного материала (деталей тормозов самолетов, тормозных накладок тракторов, автомобилей, дорожных машин, экскаваторов и т.д.) применяют материалы на железной основе.

Наиболее распространенными металлокерамическими фрикционными материалами на основе меди являются:

- МК-5 - 9% олова, 9% свинца, 4% железа, 7% графита, 2% никеля, остальное – медь (применяется в гидротрансмиссиях автомобилей, тракторов, тепловозов и других машин);
- ФАБ – 8% свинца, 7% графита, 5% железа, 11% алюминия, остальное – медь.

Наиболее распространенными металлокерамическими фрикционными материалами на основе железа являются:

- ФМК-11 -15% меди, 9% графита, 3% двуокиси кремния, 6% сернокислого бария, 3% асбеста, остальное – железо;
- МКВ-50А – 10% меди, 8% графита, 3% асбеста, 5% карбида кремния, 5% карбида бора, остальное – железо;
- СМК-80 – 23% меди, 6,5-10% марганца, 2-5% дисульфида молибдена, 6-12% нитрида бора, остальное – железо.

Фрикционные материалы изготавливают в виде тонких секторов (сегментов, полос) и крепят на стальной основе (для упрочнения).

Основные свойства этих материалов: плотность –  $5-7 \text{ г/см}^3$ , предел прочности при растяжении – 19,5- 98 МПа, при сжатии – 147—490 МПа, твердость -15-100 НВ, коэффициент линейного расширения при 25 – 500°С составляет 11-22.

## Углерод-углеродные композиционные материалы

**Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ)** представляют собой графитовую или углеродную матрицу, упрочненную углеродными волокнами. По сравнению с графитами, УУКМ имеют более высокие прочностные характеристики, обладают высокой стойкостью к термоударам и рядом других преимуществ. В зависимости от структуры армирования различают одномерные (1D), двумерные (2D), 3 мерные (3D), четырехмерные (4D) и т.д. углерод-углеродные композиционные материалы. Существуют также углеродные композиты типа nD структур армирования, в которых армирующие волокна расположены хаотично.

Примерно 81% всех углерод-углеродных композиционных материалов используется для производства тормозных дисков для самолетов, 18% — в ракетно-космической технике и только 1% — для всех остальных сфер применения. Потребность в композитах для ракетно-космической техники постоянно снижается, а объем производства тормозных дисков для самолетов растет.

Большинство **углерод-углеродных композиционных материалов** изготавливаются по жидкофазным технологиям, сходным с технологиями производства промышленных графитов и только незначительная часть — по газофазным изотермическим, термоградиентным и комбинированным: жидко-газофазным технологиям. Основным недостатком жидкофазных и газофазных изотермических технологий является большая длительность технологического процесса — от 2 до 12 месяцев.

В случае жидкофазных методов большая длительность производственного процесса получения плотного углерод-углеродного композита обусловлена, прежде всего, необходимостью многократного повторения (до 6-8 раз) циклов пропитки исходной преформы на основе углеродных волокон смолами или пекон с дальнейшей карбонизацией или графитацией для образования углеродной или графитовой матрицы. Изотермические методы получения углерод-углеродных композитов очень длительны (~600 часов) и требуют как минимум 2-3 циклов уплотнения. После каждого цикла необходимо удалять плотную поверхностную корку, чтобы открыть транспортные поры для диффузии газа. Эти операции помимо увеличения длительности процесса изготовления ведут к бесполезному расходу материала, что существенно увеличивает стоимость УУКМ. Термоградиентные газофазные методы производства углерод-углеродных композитов лишены этих недостатков — они одностадийные и достаточно быстры.

В последние годы исследования по разработке углерод-углеродных материалов и термоградиентных газофазных методов их получения во всем мире были отнесены к приоритетным направлениям, определяющим обороноспособность и основные направления научно-технического прогресса стран, обладающих этими технологиями.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Существующие технологические методы обеспечения износостойкости поверхностей деталей узлов трения подразделяют на несколько групп: химико-термические, объемная и поверхностная закалка, электрохимические, химическая обработка, механотермические, наплавка износостойких слоев, напыление порошковых покрытий, ионно-плазменная обработка, плакирование, механическое упрочнение и др. Применение этих методов в значительной мере связано с историей развития автомобилестроения в развитых странах. Само развитие этих методов было вызвано стремлением повысить эксплуатационные качества автотранспортных средств.

### **Химико-термическая обработка (ХТО)**

Целью ХТО является создание на стальной поверхности тонкого легированного слоя за счет диффузии извне легирующих элементов. Затем поверхность подвергается закалке. Поверхностный слой приобретает высокую твердость (до 60 и более единиц по шкале Роквелла). Сюда относятся цементирование, азотирование, борирование, насыщение хромом, никелем, цианирование (насыщение одновременно азотом и углеродом), борохромирование (одновременное насыщение бором и хромом), карбоборирование (одновременное насыщение углеродом и бором) и др.

Толщина упрочненного слоя может превышать 2 мм. Химико-термическая обработка получила наибольшее распространение, как метод упрочнения поверхностей из-за простоты, доступности и высокой эффективности. Так, например, цементация осуществляется в твердом, жидком и газообразном карбюризаторах. В качестве твердого карбюризатора используется древесный уголь. Процесс протекает медленно: скорость науглероживания порядка 0,1 мм/ч. Однако, если повысить температуру до 950÷980°С, процесс существенно ускоряется. В качестве газового карбюризатора используются углеводороды, а жидкого - расплавы солей, содержащих углерод. Наиболее эффективна газовая цементация с нагревом детали токами высокой частоты.

Азотированию подвергаются стальные детали при более низкой, чем при цементировании, температуре: 520÷560°С. Легирующие элементы, входящие в состав стали (Cr, Mo, V, Al), образуют с азотом стойкие нитриды. Наибольшую твердость придает алюминий, однако поверхностный слой приобретает повышенную хрупкость и наблюдается искажение формы изделия. Азотирование придает деталям высокую циклическую прочность и соответственно стойкость против усталостного изнашивания. Поэтому азотированию подвергают коленвалы, цилиндры, поршневые кольца, седла клапанов, зубья шестерен. Ресурс шеек азотированных коленвалов

превосходит амортизационный срок двигателя. Кроме износостойкости, азотирование придает деталям и высокую коррозионную стойкость. Износостойкость сохраняется при нагреве до 500÷600 °С (что весьма важно для ДВС), в то время как при нагреве цементированной поверхности выше 225÷275°С, твердость ее, а следовательно и износостойкость снижаются. Недостатком метода является увеличение деталей в размере и коробление. Поэтому азотированные элементы деталей подвергают окончательной обработке в виде полирования или шлифования.

Цианирование (нитроцементация) происходит в жидких (расплавы солей) и газовых азотно-углеродных средах. Низкотемпературное цианирование осуществляется при температуре 530÷650 °С, имеет небольшую скорость и применяется для высоколегированных инструментальных высокоуглеродистых сталей и легированных сталей с содержанием углерода до 0,4%. Обработке подвергаются ответственные резьбовые соединения, втулки, зубчатые колеса, вилки механизма коробки перемены передач, ролики, кулачковые пары. Наиболее гибким процессом является газовое цианирование. Оно поддается автоматизации и позволяет управлять содержанием С и N в отдельности. Преимущество цианирования перед цементированием и азотированием - большая скорость процесса и более высокий упрочняющий эффект.

Аналогична и технология диффузионного насыщения рабочих поверхностей деталей бором, хромом, никелем, серой в отдельности либо в различных комбинациях.

### **Поверхностная закалка**

Эта операция сопровождает химико-термическую обработку, а также имеет и самостоятельное значение. В самостоятельном виде она применяется для образования твердого износостойкого слоя на поверхности деталей из средне- и высокоуглеродных сталей и некоторых чугунов. Ей предшествует объемная термообработка: нормализация или объемная закалка и высокий отпуск. Она состоит из двух операций: нагрева поверхностного слоя и быстрого его охлаждения. По способу нагрева различают следующие методы поверхностной закалки: высокочастотный, контактный, плазменный, при нагреве в электролите, лазерный.

Наиболее распространенным и эффективным является высокочастотный метод нагрева. К генератору высокой частоты подключается охлаждаемая катушка из нескольких витков. Внутри катушки возникает высокочастотное электромагнитное поле, в которое помещают деталь. Вследствие явления электромагнитной индукции в детали возникают вихревые токи (токи Фуко), которые текут лишь в тонком поверхностном слое, где и выделяется вся образующаяся теплота. Поверхностный слой разогревается до температуры закалки за очень короткое время, недостаточное для того, чтобы тепло распространилось вглубь детали. Затем нагретая поверхность резко охлаждается потоком жидкости (обычно воды). В результате закаливается



тонкий поверхностный слой, основа же при этом остается вязкой, что предохраняет деталь от хрупкого излома при циклическом действии нагрузки.

Поверхностная закалка с электроконтактным нагревом осуществляется путем пропускания переменного тока через контакт детали с электродом в виде катящегося по поверхности детали ролика. Применяется ток промышленной частоты низкого напряжения. Источником тока является однофазный сварочный трансформатор. Из-за высокого электросопротивления в месте контакта ролика с деталью выделяется большое количество теплоты, и зона контакта разогревается до температуры закали. Нагретая поверхность охлаждается струей воды.

Плазменные методы предусматривают нагрев поверхности за счет обработки струей низкотемпературной плазмы. Плазма получается двумя способами. Первый способ заключается в использовании обычных газовых горелок, применяемых для резки и сварки металлов. В качестве сгорающей газовой среды используется смесь кислорода с ацетиленом либо другими углеводородами. Другой способ предусматривает использование разогретой струи инертного газа, продуваемого через зону дугового разряда. Устройство, генерирующее струю такой плазмы, называется плазмотроном. В качестве источника плазмы обычно используют аргон.

Нагрев в электролите осуществляется путем помещения детали в ванну с раствором кальцинированной соды или поташа. Ванну подключают к положительному полюсу источника постоянного тока, а деталь - к отрицательному. При достаточно большой силе тока поверхность детали быстро нагревается за счет того, что выделяющийся в результате электролиза водород образует на поверхности оболочку, обладающую высоким электросопротивлением. Эта оболочка является одновременно тепловым экраном, предотвращающим рассеивание тепла в электролит. Таким методом закаливают штанги толкателей и стержни клапанов газораспределительного механизма ДВС и ряд других деталей.

В последние годы все большее распространение получают лазерные технологии. Они отличаются высокой культурой производства и эффективностью. Лазерное излучение в инфракрасном диапазоне, сфокусированное в пятно диаметром порядка десятка микрометров, совершает пилообразное движение (сканирование) по поверхности детали, покрывая весь выделенный под закалку участок. Скорость нагрева микрообъемов детали, взаимодействующих с лучом, и последующего охлаждения достигает  $10^6$  К/с. Это обеспечивает закалку поверхностного слоя, глубина которого регулируется за счет изменения скорости сканирования. Сканирование производится путем перемещения детали по заданной программе специальными механическими устройствами. Используются как твердотельные лазеры, работающие в импульсном режиме, так и газовые с непрерывным процессом излучения. Лазерная закалка обеспечивает получение однородной мелкокристаллической поверхностной структуры, обладающей повышенной твердостью и

износостойкостью. После термообработки лазерным лучом не происходит коробление элементов рельефа детали, не наблюдается заметное ухудшение качества поверхности. Из-за высокой стоимости процесса лазерной закалки подвергаются самые дорогостоящие и ответственные детали, например, коленвалы ДВС.

Эффективным методом повышения износостойкости деталей является лазерное легирование с одновременной закалкой поверхностного слоя. Поверхность, подлежащая обработке, покрывается тонким слоем вещества, содержащего легирующие элементы. Так же, как и при лазерной закалке, луч сканирует по поверхности детали. Однако режим сканирования подбирается таким, чтобы температура в микрообъемах поверхности обеспечивала плавление. Таким образом проплавляется весь поверхностный слой. В процессе плавления легирующие элементы внедряются в кристаллическую решетку материала детали. Замечательным является то, что из-за высокой скорости нагрева и последующего охлаждения, помимо твердых растворов легирующих элементов, в материале детали возникают метастабильные структуры с избыточным по сравнению с твердым раствором содержанием легирующего элемента. Таким образом, возникает возможность внедрения в кристаллическую решетку даже такого элемента, с которым вещество детали вообще не может образовать твердого раствора. Такие метастабильные структуры, будучи прочно связаны с основой, обладая при этом сверхвысокой твердостью, обеспечивают резкое повышение износостойкости.

В качестве примера приведем способ резкого упрочнения алюминиевых сплавов. Упрочняющим элементом преимущественно является кремний. Для образования твердого раствора в алюминий можно вводить не более 12% кремния. Избыточный кремний выпадает в виде крупных включений и не вызывает роста твердости материала. Лазерный метод позволяет вводить в алюминий до 40% кремния и выше. Избыточный кремний образует мелкодисперсную равномерно распределенную в объеме фазу, резко упрочняющую материал. При этом твердость поверхностного слоя становится сравнима с твердостью закаленной стали. Одновременно снижается свойственная алюминию адгезионная активность и резко улучшаются эксплуатационные свойства деталей из алюминиевых сплавов. Таким способом повышают износостойкость поршней ДВС, цилиндровых гильз.

### **Электрохимические покрытия**

Их наносят на поверхности методом электролиза, что широко используется в современной технологии. Чаще всего применяются электролитическое хромирование, серебрение, нанесение покрытия из олова, свинца, цинка, индия и сплавов легкоплавких металлов. Вещества могут наноситься как непосредственно рабочие слои, так и как элементы многослойных покрытий.

Одно из главных мест занимает хромирование с целью повышения износостойкости. Хром обладает высокой твердостью, хорошим сцеплением со сталью и высокой химической стойкостью. Все элементы подшипников качения подвергаются хромированию. Для повышения тепло- и кислотостойкости покрытие обрабатывается парами бензина при температуре около 1000°C. При этом углерод вступает в химическое соединение с хромом с образованием карбидов, которые заполняют микротрещины в покрытии. Гладкие хромовые покрытия, обладающие плохим смачиванием маслами, плохо прирабатываются, поэтому часто используются пористые покрытия. Такие покрытия наносят на поршневые кольца. Масло, находящееся в порах, предотвращает схватывание в ходе приработки. У хромированных гильз цилиндров ДВС поры заполняют мелкодисперсным дисульфидом молибдена, что также способствует приработке. Хромовое покрытие обладает высоким сопротивлением износу в условиях граничной смазки. Хром, мало изнашиваясь сам, мало изнашивает и сопряженную стальную поверхность. Это было установлено при изучении изнашивания стальных гильз цилиндров и поршневых колец ДВС.

Серебро наносится гальваническим методом, преимущественно на детали электроконтактных устройств. Применение серебряных, а также золотых и палладиевых покрытий позволяет резко снизить переходное сопротивление в скользящих электрических контактах. Использование серебра как антифрикционного материала оказалось малоэффективным.

В технике подшипников скольжения широко применяются электролитические покрытия деталей оловом, свинцом, индием и другими мягкими и пластичными металлами и сплавами. Использование таких покрытий позволяет ускорить приработку поверхностей деталей. Наиболее часто используются оловянные и олово-свинцовые покрытия. Олово и олово-свинцовые сплавы хорошо сцепляются с основой. Из-за низкой твердости покрытия существенно возрастает фактическая площадь контакта и снижаются контактные напряжения. Покрытия наносят на вкладыши подшипников скольжения ДВС. Покрытия из чистого свинца не применяются из-за низкой коррозионной стойкости к воздействию кислот, содержащихся в смазочных маслах. Покрытия цинком применяются при производстве кузовных деталей автотранспорта. При этом срок службы покрытия достигает десяти лет.

### **Химическая обработка**

Данный метод предназначен для создания защитных слоев за счет химических реакций. Большой интерес представляют никель-фосфорные покрытия, получаемые за счет выделения металлов из раствора их солей с помощью химических препаратов - восстановителей. Покрытие содержит 92÷95% Ni и 5÷8%P. Прочность сцепления с основой повышается за счет термообработки покрытия. Термообработка также повышает твердость и антикоррозийность. Покрытия хорошо прирабатываются, причем в ходе

приработки вследствие высокой пластичности материал покрытия с вершин выступов частично перетекает во впадины микрорельефа. Повышается фактическая площадь контакта и снижаются контактные напряжения. Однако покрытия имеют низкую стойкость к циклическому нагружению и способны отслаиваться.

Значительное место в технологии повышения износостойкости занимают оксидирование и фосфатирование. Оксидирование - это искусственное создание оксидной пленки. На стали формируется пористая пленка окиси железа  $Fe_3O_4$  малой толщины (до 3 мкм), имеющая малую твердость и хорошее сцепление с основой. Она хорошо удерживает смазку, предотвращает заедание и, разрушаясь, образует тонкий абразив, способствующий приработке. Пленку получают разными путями: химическим, электрохимическим, термическим и термохимическим. Химическая обработка осуществляется в щелочных и кислотных средах при температуре раствора  $138\div 165^\circ C$ . Образующаяся пленка помимо оксидов содержит некоторое количество фосфатов. Применяется также обработка паром. Термическое и химико-термическое оксидирование проводится путем нагрева деталей в расплавленной селитре либо на воздухе.

Важное значение имеет нанесение защитной оксидной пленки на поверхность деталей из алюминия и его сплавов. Оксидная пленка имеет высокую твердость и при химическом оксидировании обладает толщиной до 5 мкм. Пористая пленка пропитывается смазочными маслами, содержащими коллоидный графит, либо дисульфид молибдена, что придает подшипниковым вкладышам высокие антифрикционные свойства. Часто защитные пленки получают электрохимическим путем толщиной до 0,3 мм методом глубокого анодирования. Утолщение пленки происходит как за счет проникновения вглубь детали, так и наращивания на поверхности. Таким образом, увеличивается размер детали. Хороший результат дает глубокое анодирование поршней ДВС. Резко снижается износ, повышается надежность из-за уменьшения вероятности заклинивания.

Прогрессивным способом химической обработки поверхностей деталей является фосфатирование - формирование пленки из нерастворимых фосфорнокислых солей. Пленка формируется при температуре около  $100^\circ C$  в среде раствора. Толщина пленки достигает 50 мкм. Размеры детали меняются слабо. Она прочно сцеплена с основой, жаростойка (до  $600^\circ C$ ), устойчива к воздействию кислот, содержащихся в смазке, имеет низкую твердость и высокую пористость. Она пропитывается маслом, содержащим твердосмазочные добавки, и хорошо защищает детали от задира. Успешно используется для защиты поверхностей цилиндрических гильз, поршневых колец, вкладышей подшипников, пальцев верхних головок шатунов, резьбовых соединений.

Одним из эффективных способов химической обработки поверхностей является сульфидирование, заключающееся в обогащении поверхностных слоев стальных деталей серой. Сульфидирование проводят в жидкой, твердой или газовой серосодержащих средах. Оно может быть низко-, средне- и

высокотемпературным (150÷450, 540÷580, 850÷950 °С соответственно). В зависимости от состава сернистой среды, температуры и длительности процесса наряду с FeS, FeS<sub>2</sub> образуются и другие железо-серные соединения. Жидкое сульфидирование осуществляется в соляных ваннах. Глубина сульфидированного слоя достигает 50 мкм. Разновидностью сульфидирования является сульфоцианирование, при котором поверхность одновременно насыщается серой, азотом, углеродом при температуре 540÷580°С в жидкой среде. Применяется и сульфидирование в твердой среде порошка сернистого железа. Шероховатость у прошедших сульфидирование поверхностей значительно выше исходной, несколько увеличиваются размеры деталей. В процессе эксплуатации сульфидная пленка, менее прочная, чем основной металл, легко разрушается и отделяется, предотвращая схватывание. Сульфидный слой и мягкие слабоабразивные продукты износа обладают высокой адсорбционной способностью и активируют молекулы масла. Благодаря таким свойствам приработка ускоряется, и быстро устанавливается равновесная шероховатость с высоким качеством, приближающаяся к 9÷10 классам. Интересно то, что по мере износа под влиянием температуры и давления атомы серы диффундируют вглубь поверхности, повышая антифрикционные свойства. В результате насыщенный серой слой значительно превышает первоначальный по своим противоизносным свойствам. В ДВС благодаря циркуляции смазки наличие сульфидированных деталей приведет к улучшению условий работы всех трущихся пар, так как сульфиды, переносимые маслом, попадают на все поверхности трения. Сульфоцианирование, в дополнение к сульфидированию, не только ускоряет приработку, но и существенно повышает износостойкость за счет повышения твердости и усталостной прочности. Сульфидируют и сульфоцианируют цилиндры гильзы и поршневые кольца ДВС, стальные подшипники скольжения, резьбовые соединения, детали шарниров подвески.

К современным методам создания защитных пленок на поверхностях ответственных деталей относится химическое воздействие газовой среды при определенных значениях температуры и давления (иногда с применением пучков ускоренных ионов). Примером такого метода является создание на поверхности прочно связанного с основой слоя дисульфида молибдена. Для этого на деталь наносится электролитическим путем слой молибдена. Затем поверхность при определенной температуре и давлении обдувают парами серы. Дисульфид молибдена, образующийся в ходе поверхностной реакции, прочно связывается с основой и образует надежное твердосмазочное покрытие. Если затем поверхность бомбардировать ускоренными ионами, то кристаллы дисульфида молибдена плоскостями наименьшего сопротивления сдвигу устанавливаются параллельно поверхности детали, и коэффициент трения по такой поверхности близок к нулю (аномально низкое трение). Другим примером такого способа создания покрытия является формирование на поверхности тонкой алмазной пленки, обладающей высочайшей износостойкостью. В этом случае специально подготовленная поверхность

детали при соответствующих диаграмме фазового равновесия углерода значениях температуры и давления обдувается одним из углеводородов. На поверхности образуется тонкая (до 10 мкм) пленка углерода в виде алмаза. Здесь мы говорим уже о технологии XXI века.

### **Механотермическое формирование износостойких покрытий**

Метод заключается в том, что защитный слой кристаллизуется из расплава в стесненных условиях под нагрузкой. При этом в нем отсутствуют полости и сквозные поры, основной металл практически не подплавляется и не попадает в наплавляемый слой, который надежно соединяется с основой. Используют две технологических схемы: фрикционное и электроконтактное формирование.

Первая технологическая схема включает в себя прижатие с определенным усилием к поверхности детали сухарей из материала будущего покрытия. Возможен и другой вариант: с помощью пуансона прижимается брикет из гранул или стружки. Затем покрываемая поверхность с заданной скоростью приводится в циклическое движение. Наносимый материал трется о поверхность детали, на границе выделяется теплота. В какой-то момент времени температура контакта достигает точки плавления. Плавление, а следовательно формирование износостойкого слоя, происходит под давлением от 5 до 100 МПа при скорости скольжения  $1 \div 8$  м/с. При этом время формирования слоя составляет  $5 \div 70$  с. Этим способом создается покрытие толщиной от 0,5 до 10 мм. На стальную основу наносятся слои из медных, алюминиевых и других сплавов. Метод имеет ряд ограничений. Он применим для деталей цилиндрической формы, приводимых во вращение. Температура плавления материала покрытия должна быть меньше, чем у материала основы. Этот метод успешно применяется для создания медного покрытия на поверхностях гильз цилиндров ДВС, что стимулирует возникновение режима избирательного переноса. При испытаниях пара цилиндр - поршень практически не изнашивается.

При электроконтактном формировании тепло выделяется в результате прохождения электрического тока через обладающий большим сопротивлением гранулированный материал, прижимаемый с заданным давлением к поверхности детали. Здесь форма поверхности детали может быть любой. Температурные ограничения тоже отсутствуют. Этим методом на сталь наносится широкий спектр материалов: легированные стали, твердые сплавы, износостойкие композиции. Таким же образом осуществляется электроконтактная наплавка, основанная на принципе контактной сварки. Наплавляемый материал (обычно в виде ленты) прижимается к поверхности детали электродом. Между электродом и деталью прикладывается разность потенциалов от 2 до 12 В. Можно использовать в качестве источника тока сварочный трансформатор. Если наплавляют длинномерные детали, то электрод делают в виде ролика, катящегося по детали и осуществляющего приварку защитного покрытия.

## **Наплавка износостойких слоев**

Это один из наиболее распространенных способов восстановления изношенных деталей автотранспортных средств. Имеется большое число методов наплавки, которые различаются источниками тепловой энергии, способами защиты наплавляемого металла, уровнем автоматизации. Однако все виды наплавки имеют общие металлургические и физико-химические основы. К ним относится расплавление наносимого металла с частичным расплавлением поверхностного слоя, перемешивание расплавов, кристаллизация.

Наибольшее распространение получила электродуговая наплавка, осуществляемая ручным и полуавтоматизированным способами. При механизированной наплавке вместо отдельных электродов применяется свернутая в бухту проволока либо электродная лента. Чаще всего применяется наплавка под слоем флюса. Порошковый флюс, непрерывно подаваемый в зону дуги образует над швом шлаковую оболочку, которая из-за низкой теплопроводности уменьшает скорость охлаждения наплавленного материала, что способствует нормализации структуры, а также защищает шов от окисления, предотвращает разбрызгивание металла, доля которого во шве колеблется от 30 до 65%, что ухудшает свойства защитного слоя и делает их в значительной мере случайными величинами. Наплавка под флюсом успешно применяется при восстановлении клапанов автомобильных двигателей, осей шарниров и других сильноизнашиваемых деталей. Качество покрытия заметно улучшается, когда исключается контакт наплавляемого материала с кислородом воздуха. Для этого процесс проводят в среде углекислого газа, аргона и их смесей. Интересен высокоэффективный метод наплавки порошковой проволокой, представляющей собой тонкую трубку из стали с запрессованной в ней порошковой смесью, обеспечивающей получение требуемого состава наплавляемого слоя.

Применение плазменно-дугового вместо обычного электродугового разряда позволило существенно снизить вредное влияние подплавления основного материала. Здесь возможны разные варианты подачи наплавляемого материала в зону наплавки: подача проволоки, проплавление заранее уложенной проволоки (так наплавляют клапана ДВС), вдувание наплавляемого порошка вместе с потоком плазмы. Последний метод предпочтителен, поскольку позволяет полностью автоматизировать процесс.

## **Напыление покрытий из порошковых материалов**

Этот метод является одним из наиболее эффективных способов создания износостойких слоев. Если в высокотемпературную струю газа подать частицы порошка или капли расплава, то при столкновении с поверхностью они деформируются и прочно прикрепляются к детали. Существует две разновидности такой технологии: газоплазменное напыление и электрическое напыление. В газоплазменном методе тепло выделяется в

результате сжигания смеси горючего газа с кислородом, в электрическом - источнике тепла является электрическая дуга. Для газопламенного напыления в кустарных условиях производства используют обычные газовые горелки, обеспечивающие плавление и разбрызгивание материала проволоки, подаваемой в зону факела. В качестве источника высокотемпературной и скоростной струи удобно использовать плазмотрон (принцип действия которого описан выше). В этом случае напыляемый порошок подается в струю плазмы. Имеются и электродуговые устройства, в которых через зону плавления в дуговом разряде двух проволочных электродов вдувается сжатый воздух. Струя раскаленного воздуха вместе с каплями расплава направляется на поверхность детали.

Другим вариантом нагрева напыляемого материала является использование индукционных токов высокой частоты, возникающих в проволоке, проходящей через охлаждаемый соленоид, генерирующий высокочастотное электромагнитное поле. Через катушку продувается струя воздуха, которая подхватывает капли расплавившейся проволоки и ударяет их о поверхность детали.

Главным достоинством метода напыления является его универсальность - независимость от природы материала детали. Можно наносить покрытия не только на металлы, но и на керамику, дерево, бетон, полимеры, ткани, бумагу. Это связано с тем, что напыление не оказывает заметного теплового воздействия на основу. То же можно сказать и о напыляемых материалах. Напыляют цветные металлы и сплавы, стали, твердые сплавы и керамику, пластмассы, декорирующие смеси. Не имеют также особого значения форма и размеры деталей.

Напыление широко применяется для восстановления формы изношенных деталей. Большую роль играет подготовка поверхности под напыление. Поверхность должна быть хорошо очищена от загрязнений, иметь шероховатость и пористость. Это гарантирует хорошее сцепление наносимого материала с основой. Поверхности обезжиривают с помощью промывки в растворителях (бензин, бензол, ацетон, четыреххлористый углерод и т.д.). Для устранения дефектов поверхностной структуры используется обработка струей абразива (пескоструивание).

В последнее время для нанесения износостойких твердосплавных покрытий используется метод детонационного напыления. Установка для детонационного напыления напоминает пулемет, стреляющий порциями разогретого порошка. В замкнутую камеру сгорания, к которой прикрепляется ствол, подается смесь кислорода и горючего газа (ацетилен, пропан-бутан и др.). Ствол направляют на напыляемую поверхность. Через загрузочное отверстие в камеру подается порошок. Смесь поджигается электрической искрой и взрывается. Раскаленные частицы вместе с продуктами сгорания ударяются об обрабатываемую поверхность и закрепляются на ней. Температура частиц в момент удара достигает 4000°C. Частота выстрелов - 3÷4 в секунду. Недостатком метода является неравномерное распределение материала по поверхности, что устраняется



путем отделочной обработки шлифованием. Так создают покрытия из металлокерамики: карбидов вольфрама, титана и кобальта, нитридов титана и бора, окиси алюминия. Покрытия обладают высокой твердостью и износостойкостью. Износ снижается до 10 раз.

Газотермическое напыление успешно используется в автомобилестроении и при ремонте и эксплуатации автотранспортных средств. Износостойкость коленвалов грузовых машин марки ГАЗ после нанесения газотермического покрытия повышается до 4 раз. Такой же результат получается при напылении покрытия на поршневые кольца взамен электролитического хромирования. Хороший результат дает нанесение покрытия из двуокиси алюминия.

### **Ионно-плазменные методы**

Данные методы весьма эффективны. В связи с тем, что их применение требует высокого разрежения, они осуществляются в вакуумных камерах, поэтому являются достаточно дорогостоящими и применяются лишь для весьма ответственных деталей, работающих при высоких температурах в условиях адгезионного и окислительного изнашивания. В условиях вакуума наносимый металл превращается в газ, пар, ионизированный пар и плазму, а затем в атмосфере реакционного или инертного газа оседает на поверхности детали. Покрытие может быть получено способами термического испарения, катодного или ионно-плазменного распыления или с помощью бомбардировки поверхности потоком из частиц осаждаемого вещества. В качестве реакционного газа применяются азот или углеводород, в результате формируется нитридное или карбидное покрытие.

Имеется несколько разновидностей метода. Катодное распыление основано на использовании расположенных в вакуумной камере 2-х электродов. После откачки воздуха камера заполняется аргоном, на электрод с деталью подают отрицательный потенциал. Поверхность детали очищается в газовом разряде путем бомбардировки ионами. Далее отрицательный потенциал подается на испаряемый материал, который распыляется и ионизируется в плазме разряда. Частицы осаждаются на детали, создавая покрытие. Если использовать реакционный газ, пролетая через который атомы металла образуют нитриды, карбиды или окислы, можно получить требуемый структурно-фазовый состав покрытия. Скорость осаждаемых частиц достигает 10 км/с, поэтому они прочно сцепляются с основой. Наилучшие результаты получаются при использовании для испарения лучевых методов нагрева (электронно-лучевого и лазерного). Применяется дополнительное ускорение ионов наложением электрического поля.

Широко распространена технология нанесения покрытий из плазмы дугового разряда с холодным катодом. Материал испаряется катодным пятном электрической дуги - сильноточным низковольтным разрядом, развивающимся в парах материала электродов. Между анодом и катодом из напыляемого материала возникает разряд, протекающий в парах продуктов

эрозии катода. Металлическая плазма выделяется из микропятен катода, в зонах которых возникают локально высокая температура и давление. Прикладывая к детали ускоряющий потенциал, повышают скорость генерируемых в плазме ионов. Такая технология реализуется в имеющихся на многих предприятиях установках "Булат". Наиболее часто наносят покрытия из TiC, TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - наиболее твердых износостойких материалов. Развитие метода связано с внедрением плазменных ускорителей, формирующих сфокусированный высокоскоростной ионно-плазменный пучок, сканирующий поверхность детали. Здесь так же, как и в электронно-лучевой трубке, фокусирование пучка и сканирование осуществляются с помощью электростатических, магнитных линз и отклоняющих пластин. Покрытия имеют небольшую толщину 4÷10 мкм, вызывают заметное улучшение качества поверхностей, обладают высокой коррозионной стойкостью. Они используются для повышения износостойкости металлообрабатывающего инструмента, коленвалов, деталей топливной аппаратуры дизелей, клапанов и т.д.

### **Плакирование**

Метод создания толстослойных покрытий применяется при изготовлении деталей или при восстановлении их формы после изнашивания. При этом толщина слоя может составлять несколько миллиметров. Плакирование также используется при изготовлении элементов скользящих электрических контактов в целях экономии дорогостоящих материалов с высокой электропроводностью, например серебра.

Толстослойные покрытия часто наносятся методом прокатки. Сцепление слоев осуществляется за счет диффузии, стимулируемой высокой температурой. Применяются также диффузионная и электроконтактная сварка, наплавка, припаивание и другие способы. Таким методом получают биметаллические полосы, кольца. Часто наносится слой из порошковых металлов и керамики. Слои припекаются в конвейерных печах и прокатываются вместе с основой в горячем состоянии. Суспензия порошков (смеси с летучими жидкостями с добавкой клеящего вещества) может наноситься по способу шликерного литья. Затем детали просушиваются. На поверхности образуется равнотолщинный слой, удерживаемый клеем. Детали поступают в печь, клей выгорает, а наносимый материал припекается к основе. Образуется пористое твердое покрытие, которое затем пропитывается каким либо служебным материалом, например фторопластом.

### **Механическое упрочнение поверхностей**

Привлекают простота и дешевизна этого метода. Здесь используется явление значительного роста предела текучести, а следовательно и твердости материала, при высокой степени пластической деформации - деформационное упрочнение. Метод реализуется путем обкатывания

поверхностей роликами или шариками, выглаживания сферическими алмазными наконечниками, обработки струей из мелких стальных или стеклянных шариков (дробеструивание). Помимо упрочнения поверхность выглаживается, заметно снижается высота шероховатости. Вершины выступов становятся более пологими, и контакт переходит из пластического в упругое состояние. Возможно также залечивание поверхностных дефектов (микротрещин). Все это существенно повышает усталостную износостойкость, снижает срок приработки. Известны положительные результаты алмазного выглаживания шеек коленвалов дизельных и бензиновых ДВС, поверхностей распредвалов и других деталей.

Известной разновидностью методов поверхностного пластического деформирования (ППД) является технология виброупрочнения, созданная профессором Шнейдером Ю.Г. (С.Петербург). В этом способе выглаживающему индентору сообщается колебательное (вибрационное) движение и при совмещении колебательного движения индентора с поступательным по обрабатываемой поверхности при малой скорости движения можно получить полностью наклепанную поверхность, а при увеличении скорости - синусоиды или их переплетение. В этом случае говорят о частично упрочненной поверхности, которая выглядит как рельеф, называемый "крокодилова кожа".

В Самарском государственном техническом университете разработан новый технологический способ упрочняющего деформационного формоизменения поверхностей деталей узлов. Способ открывает большие возможности для повышения износостойкости, нагрузочной способности, контактной жесткости и других важных в эксплуатации характеристик узлов трения. Упрочняющее деформационное формоизменение поверхностей (далее УДФ) деталей осуществляется накатным инструментом в виде роликов 2, на периферии которых расположена замкнутая система клиновидных инденторов, например гексагональной структуры (рис. 5.56). Возможны варианты холодного накатывания и накатывания при нагреве. Разработана гамма инструментов, реализующих способ, определена область его применения, оптимизированы технологические режимы обработки, изготовлены вспомогательные приспособления и оборудование для обработки типовых деталей цилиндрической, сферической и плоской формы.

Наиболее значительное повышение износостойкости от применения этого метода происходит в узлах трения, работающих при циклических перегрузках, вибрациях и ударах в местах посадки с натягом, в подшипниках и направляющих скольжения с неблагоприятными условиями смазки, когда на гладких поверхностях реализуются условия для схватывания, задиоров, возникновения фреттинг-коррозии и других негативных проявлений. Положительное воздействие основано на создании оптимального рельефа сетки каналов, упрочнении материала (повышении предела выносливости), а также на создании в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений. Вспомогательные эффекты реализуются в способе благодаря

повышению запаса смазки в оттесненных каналах, разделению волн неровностей, лучшей прирабатываемости.

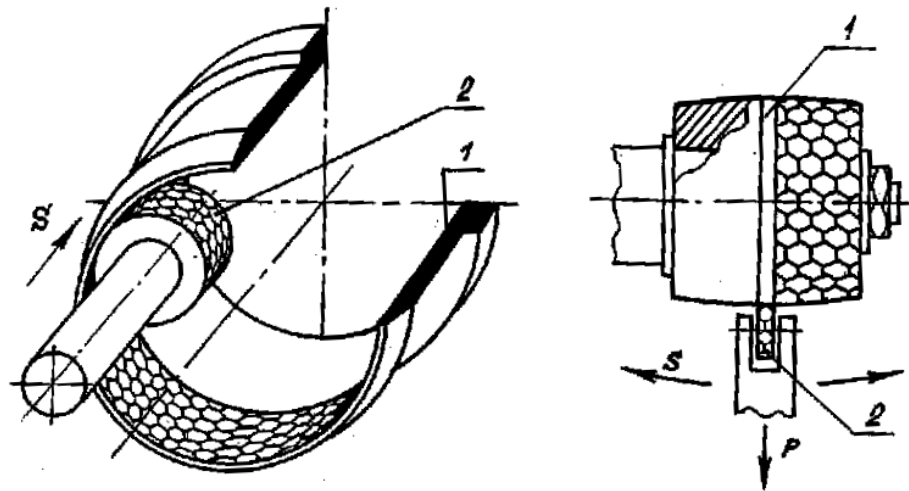


Схема процесса УДФ

Основными объектами применения УДФ являются: технологии обработки втулок и вкладышей подшипников скольжения, прямолинейных направляющих, номинально неподвижных сопряжений из черных (сталь, чугун) и цветных металлов (латунь, бронза, титановые сплавы), когда формоизмененная поверхность не подвергается дальнейшей механической обработке и является рабочей; обработки контактирующих поверхностей подшипников скольжения или неподвижных сопряжений из черных и цветных металлов и сплавов под металлические и твердосмазочные покрытия; обработки контактирующих поверхностей под металлизацию при восстановлении, ремонте или при получении биметаллических пар трения; обработки поверхностей деталей узлов трения с последующей их обдувкой микрошариками; обработки поверхностей деталей узлов трения с последующим химико-термическим упрочнением и др. Фотография деталей, прошедших УДФ, приведена на рис. 5.57. В частности, для повышения эффективности ХТО в одном из разработанных способов (рис. 5.58) химико-термическая обработка производится после механической деформации с образованием гексагональной сетки каналов.

Подобным образом на трущихся деталях создается слой, диффузионно насыщенный ионорадикалами и радикалами карбонофторида при нагреве в среде инертных газов или вакууме. Деталь помещается в контейнер с порошком карбонофторида в вакууме. Нагрев вызывает активное взаимодействие металла с частицами карбонофторида типа  $(CF_x)_n$ , что создает прочный износостойкий поверхностный слой. Температура нагрева 200 - 300 °С, давление 10 Па.