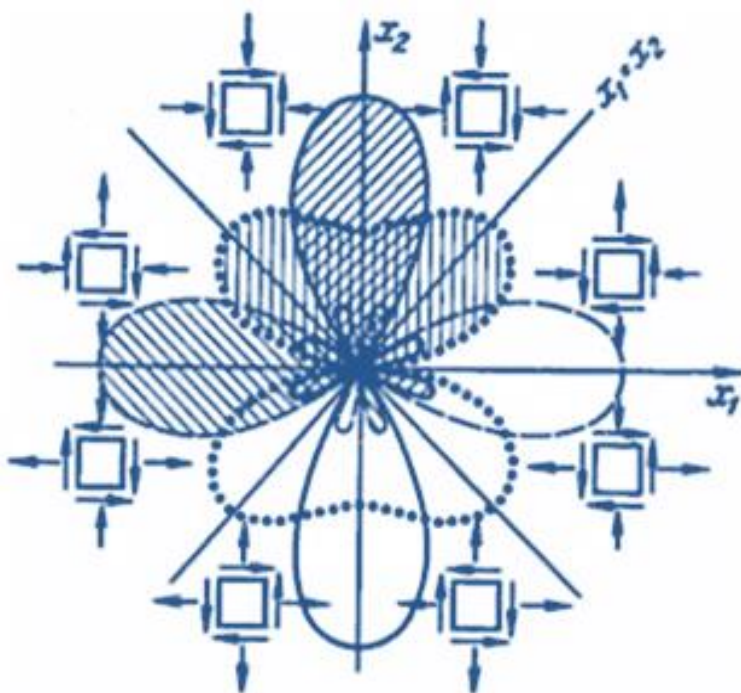


В.А. Белевитин

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Учебно-методическое пособие



**МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный гуманитарно-
педагогический университет»

В.А. Белевитин

**ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебно-методическое пособие

**Челябинск
2022**

УДК 621.8 (07)(021)

ББК 34.44я73

Б 43

Белевитин, В.А. Эксплуатационные свойства конструкционных материалов: учебно-методич. пособие / В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2022. – 137 с. – ISBN 978-5-907611-70-2. – Текст: непосредственный.

Учебное пособие посвящено описанию эксплуатационных свойств конструкционных материалов применительно к деталям узлов и механизмов автомобильного транспорта. В нем рассматриваются классификация конструкционных материалов и общие эксплуатационные требования, предъявляемые к ним, а также конструкционная прочность материалов и критерии ее оценки. Приведены методы повышения конструкционной прочности и надежности конструкционных материалов с подробной иллюстрацией особенностей и зависимостей технологических параметров.

Адресовано студентам, обучающимся по программе бакалавриата направления подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям), профиль «Транспорт».

Рецензенты: М.С. Дмитриев, д-р техн. наук, доцент

К.Н. Семендяев, канд. техн. наук

ISBN 978-5-907611-70-2

© В.А.Белевитин, 2022

© Издательство Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Классификация конструкционных материалов и общие требования, предъявляемые к ним	7
2. Конструкционная прочность материалов и критерии ее оценки	10
3. Методы повышения конструкционной прочности материалов	44
4. Методы повышения надежности конструкционных материалов	65
5. Коррозионная стойкость конструкционных материалов	74
5.1. Основные понятия и определения	74
5.2. Классификация коррозионных процессов	75
5.3. Химическая коррозия	81
5.4. Электрохимическая коррозия	88
5.5. Коррозия железо-углеродистых сплавов	93
6. Износ конструкционных материалов	97
6.1. Износ и разрушение конструкционных материалов	97
6.2. Методы испытания износостойкости конструкционных материалов	111
7. Диагностика (дефектация) деталей и механизмов двигателя	123
7.1. Методы контроля при диагностике деталей и механизмов двигателя	123
7.2. Диагностика двигателя безразборная	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	135

ВВЕДЕНИЕ

В связи с переходом общества в новую – постиндустриальную – стадию развития в направлении стратегических приоритетов структурной перестройки экономики наметилась тенденция ресурсосбережения, которая обозначила в качестве первоочередных мер на современном этапе необходимость пересмотра стандартов и технических условий на машиностроительную продукцию, норм расхода металла всех видов (эксплуатационных, ремонтных и т.д.) в соответствии с нормативно-технической документацией и учетом изменения качества продукции, повышения доли металлических заготовок и деталей, прошедших термическую, химико-термическую и специальные виды обработки (электронно-лучевой, плазменной, лазерной и др.). Снижение на этой основе металлоемкости транспортных средств и промышленно используемой автотракторной техники может стать следствием, прежде всего, научно-технического прогресса в области совершенствования структуры и качества конструкционных материалов, детерминирования интегральной технологической компетентности будущих специалистов – выпускников учреждений среднего и высшего профессионального образования. В условиях постоянного развития производства металлов и сплавов, внедрения новых конструкционных материалов возникают повышенные требо-

вания к знаниям, умениям и навыкам квалифицированных рабочих в области конструкционных материалов.

Поведение конструкционного материала под действием приложенных внешних нагрузок определяют их механические свойства, характеристики которых необходимы для выбора конструкционных материалов и режимов их термической обработки, расчетов на прочность конструкций, контроля их состояния в процессе эксплуатации. Среди характеристик механических свойств различают:

- характеристики конструкционной прочности, т.е. критерии надежности и долговечности материалов (вязкость разрушения, сопротивление усталости, коррозии, износостойкость и т.д.);

- критерии, определяемые независимо от конструктивных особенностей и характера службы изделий, определяемые при стандартных испытаниях.

1. Классификация конструкционных материалов и общие требования, предъявляемые к ним

Конструкционными называют материалы, предназначенные для изготовления деталей машин, приборов, инженерных конструкций, подвергающиеся механическим нагрузкам. Одновременно с механическими нагрузками различных видов (статическими, ударными, циклическими) в контакте с различными средами (агрессивными, абразивными и др.) конструкционные материалы нередко испытывают влияние высоких и низких температур и других условий эксплуатации.

Перечень конструкционных материалов, применяемых в машино- и приборостроении, велик, и классифицировать их можно по разным признакам. Большинство из них, такие как стали, чугуны, сплавы на основе меди (латуни и бронзы) и легких металлов (алюминия и др.), являются универсальными, обладают многочисленными достоинствами и используются в различных деталях и конструкциях. Конструкционные материалы классифицируют по свойствам, определяющим их выбор для конкретных деталей и конструкций с учетом условий эксплуатации, при этом каждая группа оценивается соответствующими критериями, обеспечивающими работоспособность в эксплуатации:

1. Конструкционные материалы, обеспечивающие жесткость, статическую и циклическую прочность (стали).
2. Конструкционные материалы с особыми технологическими свойствами.
3. Конструкционные износостойкие материалы.
4. Конструкционные материалы с высокими упругими свойствами.
5. Конструкционные материалы с малой плотностью.
6. Конструкционные материалы с высокой удельной прочностью.
7. Конструкционные материалы, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды (коррозионно- и жаростойкие, жаропрочные и пр.).

Универсальные конструкционные материалы рассматриваются в нескольких группах, если возможность их применения определяется различными критериями.

Факторы влияния (механические нагрузки различных видов, рабочие среды, высокие и низкие температуры и другие условия эксплуатации) определяют требования к конструкционным материалам, основные из которых – эксплуатационные, технологические, экономические.

Эксплуатационные требования имеют первостепенное значение. Для обеспечения работоспособности конкретных машин и приборов конструкционный материал должен иметь высокую конструкционную прочность.

Конструкционной прочностью называется комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу материала в условиях эксплуатации.

Требуемые характеристики механических свойств материала для конкретного изделия зависят не только от силовых факторов, но и воздействий на него рабочей среды и температуры, которые оказывают существенное и преимущественно отрицательное влияние на механические свойства конструкционных материалов, снижая работоспособность деталей и агрегатов. Чтобы противостоять рабочей среде, материал должен обладать не только механическими, но и определенными физико-химическими свойствами: стойкостью к коррозии, жаро- и кислотостойкостью, способностью работать при низких и высоких температурах: от $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в отдельных случаях до $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в блоке цилиндров двигателя внутреннего сгорания (ДВС)). Для обеспечения работоспособности при высокой температуре от конструкционного материала требуется жаропрочность, а при низкой температуре – хладостойкость.

В некоторых случаях важны также требования определенных магнитных, электрических и иных свойств.

Технологические требования (технологичность материала) направлены на обеспечение наименьшей трудоемкости изготовления деталей и конструкций. Технологичность материала характеризует возможные методы его обработки и оценивается обрабатываемостью резанием, давлением, сваркой, литейными свойствами, способностью к термической и химико-термической обработке, другими способами, имеет важное значение, так как от

нее зависят производительность и качество изготовления деталей.

Экономические требования сводятся к тому, чтобы конструкционный материал имел невысокую стоимость и был доступным. Стали и сплавы должны содержать по возможности минимальное количество легирующих элементов, как правило, редких и дорогостоящих. Экономические требования так же, как и технологические, приобретают особое значение при массовом производстве.

Качественный конструкционный материал должен, таким образом, удовлетворять комплексу, совокупности требований.

2. Конструкционная прочность материалов и критерии ее оценки

Конструкционная прочность – комплексная характеристика, включающая сочетание критериев прочности, надежности и долговечности. Критерии прочности материала, которым он должен удовлетворять, выбирают в зависимости от условий его работы, эксплуатации.

Несущую способность конструкционного материала, в том числе в диапазоне рабочих температур, определяют, как правило, по характеризующему сопротивлению материала пластической деформации – пределу текучести σ_T (или $\sigma_{0,2}$), поскольку при работе большинства деталей пластическая деформация недопустима.

Для приближенной оценки статической прочности конструкционного материала по величине предела проч-

ности (временного сопротивления) σ_b используют показатель твердости. Твердость – свойство, характеризующее сопротивление материала внедрению в него специального наконечника – индентора из другого, более твердого материала. Ее сущность состоит в противодействии материала местной сосредоточенной пластической деформации. Ввиду этого твердость характеризует собой прочностные свойства металлических материалов. В связи с этим давно была подмечена следующая однозначная связь между твердостью по Бринеллю HB и пределом прочности σ_b :

$$\sigma_b = k \cdot HB, \quad (2.1)$$

где k – опытный коэффициент (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Значения коэффициента k в эмпирической зависимости (2.1) для различных металлических материалов

Материал	Состояние материала	Значение k
Чугуны	–	0,15
Литейные Al-сплавы	–	0,25
Медь, бронза, латунь	После наклепа	0,40
Медь, бронза, латунь	После отжига	0,55
Дюралюминий	После закалки и старения	0,35
Дюралюминий	После отжига	0,36
Сталь малоуглеродистая	HB < 175 кгс/мм ²	0,34
Сталь высокопрочная	HB > 175 кгс/мм ²	0,36
Аустенитные стали и латунь	–	0,45

Твердость является неким универсальным свойством, замер которого позволяет простым, удобным и нетрудоемким способом, без изготовления и разрушения образцов, оценить уровень механических и ряда других свойств металлов и сплавов.

Большинство деталей машин испытывает длительные циклические нагрузки. Критерий их прочности – предел выносливости σ_R (при симметричном круговом изгибе σ_{-1}).

По величине выбранных критериев прочности металлических материалов рассчитывают допустимые рабочие напряжения. При этом, чем больше прочность конструкционного материала, тем больше допустимые рабочие напряжения и, тем самым, меньше размеры и масса детали, изготавливаемой из данного материала. Однако повышение уровня прочности конструкционного материала и, как следствие, рабочих напряжений сопровождается увеличением упругих деформаций

$$\varepsilon_{\text{упр}} = \sigma/E, \quad (2.2)$$

где E – модуль нормальной упругости (или сдвига).

Для ограничения упругой деформации конструкционный материал должен обладать высоким модулем упругости E (или сдвига), являющимся критерием его жесткости. Именно критерии жесткости, а не прочности, обуславливают размеры корпусов редукторов и других деталей, от которых требуется сохранение точных размеров и формы.

Возможно и противоположное требование. Для пружин, мембран и других чувствительных упругих элементов приборов и агрегатов, наоборот, важно обеспечить большие упругие перемещения, деформации. В этом случае от материала требуются высокий предел упругости σ и низкий модуль упругости E .

Важное значение, особенно в авиа- и ракетостроении, имеет эффективность конструкционного материала по массе. Она оценивается такими удельными характеристиками, как удельная прочность $\sigma_B/(\rho g)$ и удельная жесткость $E/(\rho g)$. Здесь ρ – плотность конструкционного материала, g – ускорение свободного падения.

Таким образом, в качестве критериев конструкционной прочности выбирают те характеристики, которые наиболее полно отражают прочность в условиях эксплуатации. Следовательно, выбору таких характеристик предшествует оценка условий эксплуатации, прежде всего видов нагружения (статический, ударный, циклический), диапазона рабочих температур, характера эксплуатационных сред и пр. Вследствие этого, кроме стандартных механических характеристик σ_B и $\sigma_{0,2}$, значения которых регламентируются ГОСТом и являются показателями металлургического и технологического качества материала, для оценки его конструкционной прочности необходимы характеристики прочности при рабочих температурах и в эксплуатационных средах.

Известно немало поломок и аварий машин и механизмов из-за хрупкого разрушения их деталей, агрегатов и

конструкций. Хрупкое разрушение, когда в отличие от вязкого разрушения (вплоть до разрушения материал обладает значительной пластичностью) испытуемый образец вплоть до излома не меняет или почти не меняет своей формы, вызывает внезапный отказ деталей в условиях эксплуатации. Оно считается наиболее опасным из-за протекания с большой скоростью при напряжениях ниже расчетных, а также возможных аварийных последствий. Свойство материала противостоять хрупкому разрушению называется надежностью и является важной характеристикой прочности конструкционных материалов в условиях эксплуатации.

Качественной характеристикой надежности является критерий K_{1C} , который показывает, какой величины достигает напряжение вблизи вершины трещины в момент разрушения. Он связывает приложенное среднее напряжение σ_{CP} с критической длиной $l_{кр}$ трещины:

$$K_{1C} = \sigma_{CP} (\alpha \cdot \pi \cdot l_{кр})^{0,5}, \quad (2.3)$$

где α – безразмерный коэффициент, характеризующий геометрию трещины. Критерий K_{1C} имеет размерность МПа·мм^{0,5}. Значение критерия K_{1C} определяют экспериментально на образцах с надрезом и заранее созданной на дне этого надреза усталостной трещиной (рис. 2.1).

Для расчета величины K_{1C} при нагружении образца фиксируют усилие в момент подрастания трещины на некоторую величину и перехода ее к нестабильному распространению.

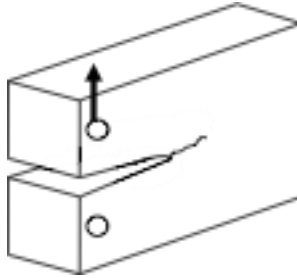


Рис. 2.1 – Образец для определения K_{1C}

Величина K_{1C} зависит от степени пластической деформации у вершины трещины (её затупления) и характеризует сопротивление развитию вязкой трещины. По этой причине критерий K_{1C} называют вязкостью разрушения. Чем больше величина критерия K_{1C} , тем выше надежность материала и его сопротивление вязкому разрушению. Критерий K_{1C} позволяет определить безопасный размер трещины при известном рабочем напряжении, или, наоборот, безопасное напряжение при известном размере дефекта.

При расчетах на прочность деталей из высокопрочных материалов (сталей с $\sigma_B \geq 1200$ МПа, титановых сплавов с $\sigma_B \geq 800$ МПа и алюминиевых сплавов с $\sigma_B \geq 450$ МПа), кроме качественной характеристики надежности, критерий K_{1C} дополняют параметры $\sigma_{0,2}$ и E .

Для оценки надежности материала используют также такие параметры, как:

- 1) ударная вязкость KCV и KCT ;
- 2) температурный порог хладноломкости t_{50} .

Эти параметры являются качественными, непригодными для расчетов на прочность. Они используются для следующих оценок: параметром KCV оценивают пригодность материала для трубопроводов, сосудов высокого давления и других конструкций повышенной надежности; параметром KCT, определяемым на образцах с усталостной трещиной у основания надреза, который более показателен, чем параметр KCV, характеризуют работу развития трещины при ударном изгибе и оценивают способность материала тормозить начавшееся разрушение. Так, если KCT = 0, то это означает, что процесс разрушения идет без затраты работы. Такой материал хрупок, эксплуатационно ненадежен. И наоборот, чем больше величина параметра KCT, определяемого при рабочей температуре, тем выше надежность материала в условиях эксплуатации. Параметр KCT также, как и K_{1C}, учитывают для деталей и конструкций особо ответственного назначения.

Порог хладноломкости характеризует влияние снижения температуры на склонность материала к хрупкому разрушению. Его определяют по результатам ударных испытаний образцов с надрезом при пониженной температуре и обозначают интервалом температур ($t_v - t_n$), либо одной температурой t_{50} , при которой в изломе образца имеется 50% волокнистой составляющей и величина KCT снижается наполовину. О пригодности материала для работы при заданной температуре судят по температурному запасу вязкости, равному разности температуры эксплуатации и температурного порога хладноломкости t_{50} . При

этом, чем ниже температура перехода материала в хрупкое состояние по отношению к рабочей температуре, тем больше температурный запас вязкости и выше гарантия от хрупкого разрушения.

Для предупреждения хрупкого разрушения конструкционные материалы должны обладать достаточной пластичностью (δ , Ψ) и ударной вязкостью (a_k).

Пластичность – свойство материала необратимо изменять форму и размеры без макроразрушения. Характеристиками пластичности являются относительное удлинение δ образцов на растяжение (обычно выражается в процентах, то есть

$$\delta = 100 \cdot (\ell_k - \ell_0) / \ell_0 = 100 \cdot \Delta l / \ell_0, \%$$

и относительное сужение Ψ (также обычно выражается в процентах, то есть

$$\Psi = 100 \cdot (F_0 - F_k) / F_0, \%$$

которое представляет собой разность между начальным сечением F_0 и конечным сечением F_k , отнесенную к начальному сечению F_0 испытываемых образцов.

Ударная вязкость характеризует склонность материала к хрупкому разрушению. Испытания на ударную вязкость соединяют в себе три вида испытаний: испытание на изгиб, испытание образца с надрезом (рис. 2.2) и испытание действием ударной нагрузки (рис. 2.3).

Ударная вязкость a_k определяется как частное от деления величины работы A_k , затраченной на разрушение образца, на его сечение F_0 в месте надреза до испытания:

$$a_k = A_k / F_0.$$

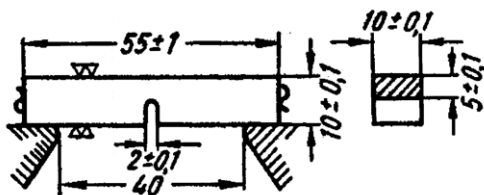


Рис. 2.2 – Образец типа ISO с надрезом, применяемый при испытаниях материалов действием ударной нагрузки

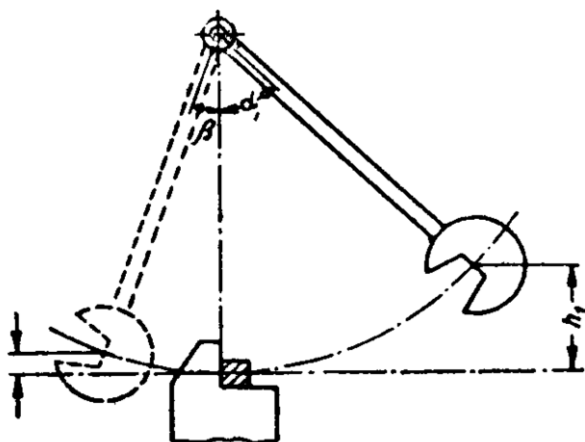


Рис. 2.3 – Схема проведения испытания материалов действием ударной нагрузки

Затраченная на разрушение испытуемого образца с надрезом работа A_k определяется выражением:

$$A_k = A_1 - A_2 = G \cdot (h_1 - h_2) = G \cdot \ell \cdot (\cos \beta - \cos \alpha),$$

где A_1 – работа, затраченная до удара; A_2 – работа, затраченная после удара; G – вес (масса) маятникового груза; h_2 и h_1 – высота подъема маятникового груза до и после удара; ℓ – расстояние центра тяжести маятникового груза от

оси вращения; α , β – углы падения и подъема маятникового груза.

В случае наступления излома материала под действием различных приложенных нагрузок происходит отказ, заключающийся в потере материалом работоспособности, причины которой разнообразны: развитие процессов усталости, изнашивания, ползучести, коррозии и пр. Эти процессы вызывают постепенное накопление необратимых повреждений в материале и его разрушение.

Долговечность – свойство материала сопротивляться развитию постепенного разрушения, обеспечивая работоспособность деталей в течение заданного промежутка времени (ресурса). Обеспечение долговечности материала означает уменьшение до требуемых значений скорости его разрушения. Для большинства деталей машин (более 80%) долговечность определяется сопротивлением материала усталостным разрушениям (циклической долговечностью) или сопротивлением изнашиванию (износостойкостью).

Циклическая долговечность характеризует работоспособность материала в условиях многократно повторяющихся циклов напряжений (повторно-переменных или циклических нагрузок).

Процессы постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящие к изменению его свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению, называют усталостью, а свойство противостоять усталости – выносливостью.

По мере развития усталостной трещины, нередко возникающей на таких дефектах поверхности, как бороздки, образующиеся при токарной обработке детали, закалочные трещины, поверхностный обезуглероженный слой и пр., уменьшается величина несущего сечения детали. После того как нагрузка на оставшуюся часть сечения превысит прочность на излом, происходит разрушение детали. Излом состоит из очага разрушения (места образования микротрещин) и двух зон – усталости и долома (рис. 2.4).

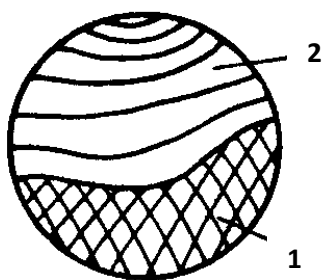


Рис. 2.4 – Схема усталостного излома

Очаг разрушения 1 примыкает к поверхности и имеет небольшие размеры и тускло-блестящую гладкую поверхность. Зону усталости формирует последовательное развитие трещины усталости. В этой зоне видны характерные бороздки 2, которые имеют конфигурацию колец, что свидетельствует о скачкообразном продвижении усталостной трещины. Зона усталости развивается до тех пор, пока в уменьшающемся рабочем сечении напряжения возрастут настолько, что вызовут его мгновенное разрушение посредством долома.

Возможные разновидности усталостного излома приведены на рис. 2.5. По внешнему виду усталостного излома можно судить о механизме развития и движения усталостной трещины, о распределении напряжений, о перегрузках и т.д.

Вид нагрузки	Высокое номинальное напряжение		Малое номинальное напряжение	
	без надреза	с надрезом	без надреза	с надрезом
Растяжение				
Односторонний изгиб				
Двусторонний изгиб				
Всесторонний изгиб				
Скручивание		 Сверление	Так же как и при высоком номинальном напряжении	

Рис. 2.5 – Вид усталостных изломов при действии различных нагрузок

Когда усталостная трещина движется по сечению детали с неравномерной скоростью (из-за перерывов в работе, при действии переменных нагрузок с различными ам-

плитудами напряжений), на поверхности излома наблюдаются кольца (аналогичные кольцам на срезе ствола дерева), которые называют «линиями отдыха» и всегда концентрически расходятся от того места, где началось усталостное разрушение материала.

Цикл напряжения – совокупность изменения напряжения между двумя его предельными значениями σ_0 и σ_H в течение периода времени T . Он характеризуется коэффициентом асимметрии цикла (рис. 2.6):

$$R = \sigma_H / \sigma_0,$$

средним напряжением σ_{CP} :

$$\sigma_{CP} = (\sigma_0 + \sigma_H) / 2,$$

максимальным отклонением от среднего значения, то есть амплитудой напряжения:

$$\sigma_a = \pm (\sigma_0 - \sigma_H) / 2$$

и удвоенной величиной амплитуды напряжения, называемой размахом напряжения:

$$2\sigma_a = \pm (\sigma_0 - \sigma_H).$$

Циклом действия нагрузки, который обозначают L , называют время, за которое нагрузка, начиная от среднего значения, проходит максимум и минимум и возвращается к исходной величине. Цикл действия нагрузки L совпадает по величине с периодом T цикла напряжения.

При экспериментальном определении сопротивления материала усталостным разрушениям (циклической долговечности) за основной принят синусоидальный цикл изменения напряжений.

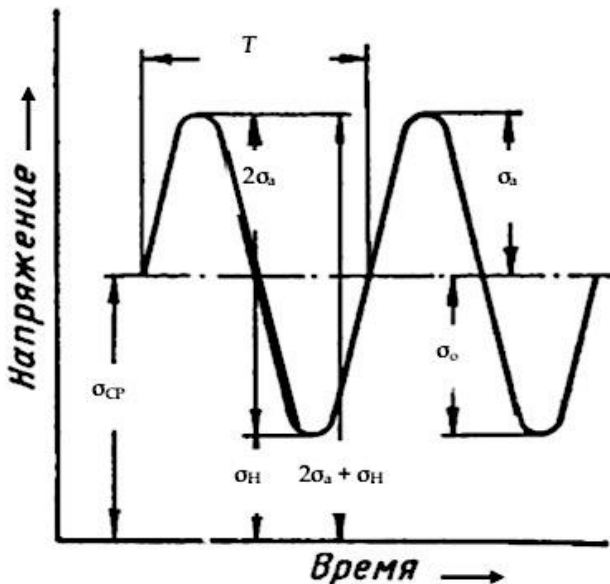


Рис. 2.6 – Диаграмма «напряжение – время»

Различают симметричные циклы ($R = -1$) и асимметричные циклы (R изменяется в широких пределах). Различные виды циклов характеризуют разные режимы работы деталей машин и, соответственно, различные режимы испытаний на усталостную прочность (рис. 2.7):

а) действие сжимающей колеблющейся нагрузки (σ_0 и $\sigma_n < 0$);

б) действие знакопеременной нагрузки (σ_0 и σ_n имеют разные знаки);

в) действие растягивающей колеблющейся нагрузки (σ_0 и $\sigma_n > 0$).

В этих трех режимах испытаний различают семь видов нагрузок σ_a :

1. Нагружение в условиях действия колеблющейся сжимающей нагрузки. Величины σ_0 и σ_H – это напряжения сжатия, а среднее напряжение σ_{CP} отрицательное и больше по величине, чем амплитуда напряжения σ_a .

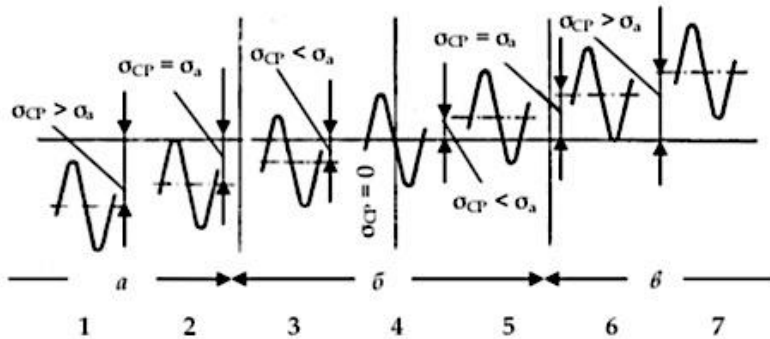


Рис. 2.7 – Различные режимы приложения нагрузки при определении предела усталости: *а* – область действия колеблющейся сжимающей нагрузки; *б* – область действия знакопеременной и *в* – область действия колеблющейся растягивающей нагрузки

2. Действие колеблющейся сжимающей нагрузки, но без дополнительного нагружения, в этом случае $\sigma_H = 0$. Отрицательное среднее напряжение σ_{CP} равно амплитуде напряжения σ_a , и размах напряжения $2\sigma_a$ равен максимальному значению напряжения σ_0 .

3. Нагружение, сочетающееся с действием знакопеременной нагрузки: σ_0 отрицательное, σ_H положительное, σ_{CP} отрицательное и меньше, чем амплитуда напряжения, то есть $\sigma_{CP} < \sigma_a$.

4. Действие знакопеременной нагрузки без дополнительного нагружения: σ_0 и σ_H равны по абсолютной величине ($|\sigma_0| = |\sigma_H|$), $\sigma_{CP} = 0$, действует только напряжение σ_a .

5. Нагружение, сочетающееся с действием знакопеременной нагрузки: σ_0 положительное, σ_H отрицательное, σ_{CP} положительное.

6. Действие колеблющейся растягивающей нагрузки без дополнительного нагружения: $\sigma_H = 0$, σ_{CP} положительное и равно амплитуде напряжения σ_a .

7. Нагружение, сочетающееся с действием колеблющейся растягивающей нагрузки: σ_0 и σ_H положительные, растягивающие, σ_{CP} также положительное и больше, чем амплитуда напряжения, то есть $\sigma_{CP} > \sigma_a$.

В связи с этим уместно напомнить, что выбору критериев конструкционной прочности, их характеристик предшествует оценка условий эксплуатации, прежде всего, видов нагружения (статический, ударный, циклический), диапазона рабочих температур, характера эксплуатационных сред и пр.

Пределом усталости σ_D при повторно-переменной нагрузке называют амплитуду напряжения (колеблющегося около заданного среднего значения), которое испытываемый образец может выдерживать «бесконечно большое» число раз, не разрушаясь и не давая недопустимой деформации.

Для всех видов нагрузок, применяемых при определении предела усталости σ_D , данные записывают в виде:

$$\sigma_D = \sigma_{CP} \pm \sigma_a.$$

Все термины и обозначения, применяемые при испытаниях на усталостную прочность при повторно-переменных нагрузках, приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Термины и обозначения, применяемые
при испытаниях на усталостную прочность**

Символ	Термин
σ_0	Верхнее значение напряжения цикла нагрузки
σ_H	Нижнее значение напряжения цикла нагрузки
σ_{CP}	Среднее значение напряжения, равное $\sigma_{CP} = (\sigma_0 + \sigma_H)/2$
σ_a	Амплитуда напряжения нагрузки $\sigma_a = \pm (\sigma_0 - \sigma_H)/2$
$2\sigma_a$	Размах напряжения, равный $(\sigma_0 - \sigma_H)$
S, r	Отношения σ_H/σ_0 и σ_{CP}/σ_0 соответственно
L	Цикл переменной нагрузки (полная величина колебания)
n	Число циклов переменной нагрузки, 1/мин
N	Число циклов, выдерживаемых образцом до разрушения
N_p	Число циклов предварительной переменной нагрузки при многоступенчатых испытаниях
σ_D	Предел усталости
σ_A	Амплитуда напряжения предела усталости при заданном значении среднего напряжения
σ_M	Среднее напряжения при определении предела усталости
σ_{0Y}	Верхнее значение напряжения при определении предела усталости и заданных значениях σ_{CP} или σ_H
σ_{HY}	Нижнее значение напряжения при определении предела усталости и заданном значении σ_{CP}
$2\sigma_A$	Размах напряжения при определении предела усталости, равный $(\sigma_{0Y} - \sigma_{HY})$
S	Отношение значений напряжений σ_{HY}/σ_{0Y} или σ_H/σ_0
R	Отношение значений напряжений σ_M/σ_{0Y} или σ_{CP}/σ_0
σ_A/σ_B	Усталостная прочность
σ_W	Предел прочности при знакопеременной нагрузке
β_K	Коэффициент, учитывающий влияние надреза на прочность испытуемого образца: $\beta_K = \sigma_A(\text{ненадрезанного образца})/\sigma_A(\text{надрезанного образца})$
σ_{Sch}	Предел прочности при колеблющейся (т.е. знакопеременной) нагрузке

Для определения предела усталости σ_D проводят длительное испытание образцов (рис. 2.8) с приложением

динамической нагрузки. Предел усталости σ_D определяют в большинстве случаев по методу Велера. Изготовленные из одного и того же материала образцы (от 6 до 10 шт.) одинаковой формы и обработки подвергают действию переменных нагрузок различной амплитуды до разрушения. Каждый отдельный образец испытывается при постоянной амплитуде прикладываемого напряжения. Определяемой величиной является число циклов n приложения нагрузки, которое образец выдерживает до разрушения.

Образец	Форма образца	Примечание
Постоянного диаметра		Для специальных случаев (проволока)
Профилированный		$r_s/d_0 \geq 3$ Допустимое уменьшение d_0 в середине образца не должно превышать 0,05 мм
С надрезом	 Надрез острого профиля	$t/d = 0,1$ Радиус закругления $r = 0,1$ мм $d_k = d_0$ Образец без надреза для сравнения

Рис. 2.8 – Формы образцов для определения предела усталости σ_D

Испытания проводятся таким образом, что первый образец разрушается уже после небольшого числа циклов.

Затем, постепенно снижая амплитуду нагрузки для каждого последующего испытуемого образца, добиваются того, чтобы образец мог выдерживать ее действие «бесконечно долго». По полученным результатам строится функциональная зависимость между амплитудой напряжения σ_a предела усталости при заданном значении среднего напряжения и числом циклов N , переносимых образцом без разрушения (рис. 2.9).

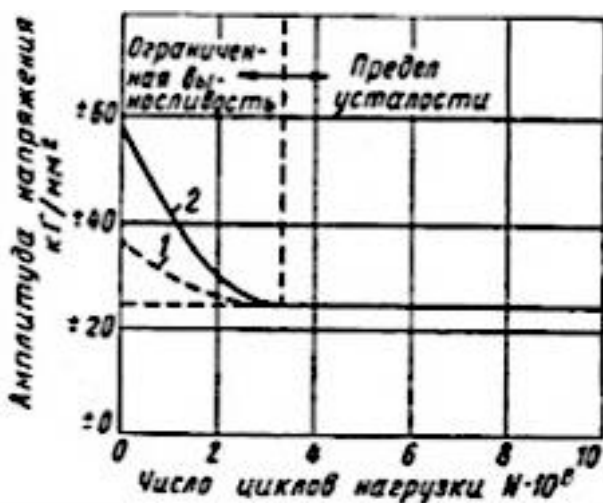


Рис. 2.9 – Вид кривой Велера в линейном масштабе:
1 – линии усталости; 2 – кривая Велера

Сначала предел усталости при повторно-переменной нагрузке с увеличением числа циклов нагрузки N падает быстро, а затем постепенно асимптотически приближается к определенному граничному значению, которое образец может выдерживать «бесконечно долго», которое и является пределом усталости материала.

Если амплитуда нагрузки несколько превысит это значение, образец после определенного числа циклов разрушится. Эта нагрузка, которую материал образца может выдерживать лишь некоторое ограниченное время (число циклов нагружения), называется выносливостью. Число циклов, которое образец может перенести до разрушения, представляет собой длительность службы материала.

Часто зависимость между нагрузкой и числом циклов выражают в двойном или полулогарифмическом масштабе, когда переход от ограниченной выносливости к пределу усталости в течение неограниченного числа циклов имеет резкий перегиб, разделяющий две прямые (рис. 2.10).

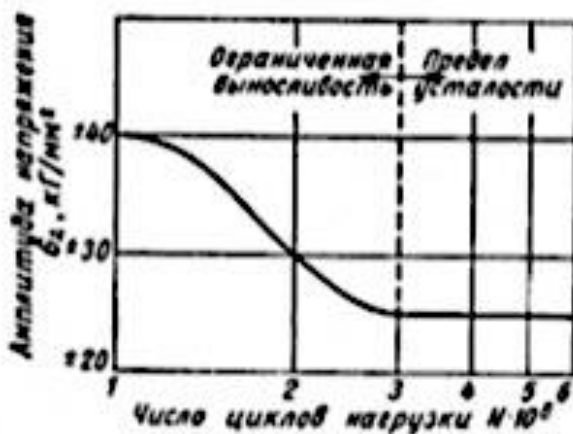


Рис. 2.10 – Вид кривой Велера в полулогарифмическом масштабе

Предел усталости рассчитывается для «бесконечно большого» числа циклов нагружения. На практике для нахождения величины предела усталости достаточно оп-

ределенное, конечное число циклов нагружения. Эта величина зависит от вида испытываемого материала:

Прочная сталь	$3 \cdot 10^6$
Мягкая сталь	$10 \cdot 10^6$
Медь и сплавы на ее основе.....	$50 \cdot 10^6$
Легкие металлы.....	$30-100 \cdot 10^6$

На рис. 2.11 показаны три области, расположенные под кривой Велера «нагрузка – число циклов»: I – область перегрузок, в которой наблюдаются повреждения материала; II – область перегрузок, в которой не наблюдаются повреждения материала; III – область нагрузок, соответствующих пределу усталости.

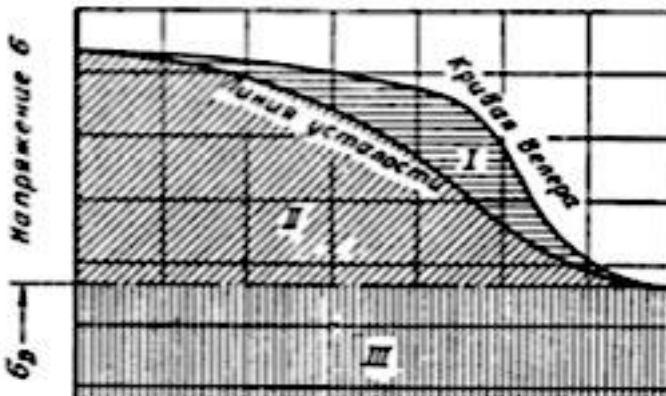


Рис. 2.11 – Кривая Велера и линия усталости

Предел усталости при знакопеременном изгибе приближенно может быть рассчитан исходя из предела прочности при растяжении σ_B или твердости по Бринеллю HB:

$$\sigma_{BW} \approx \pm 0,5\sigma_B \approx \pm 0,18 HB30.$$

На основании данных кривых Велера могут быть составлены диаграммы предела усталости, показывающие его зависимость от нагрузки (рис. 2.12).

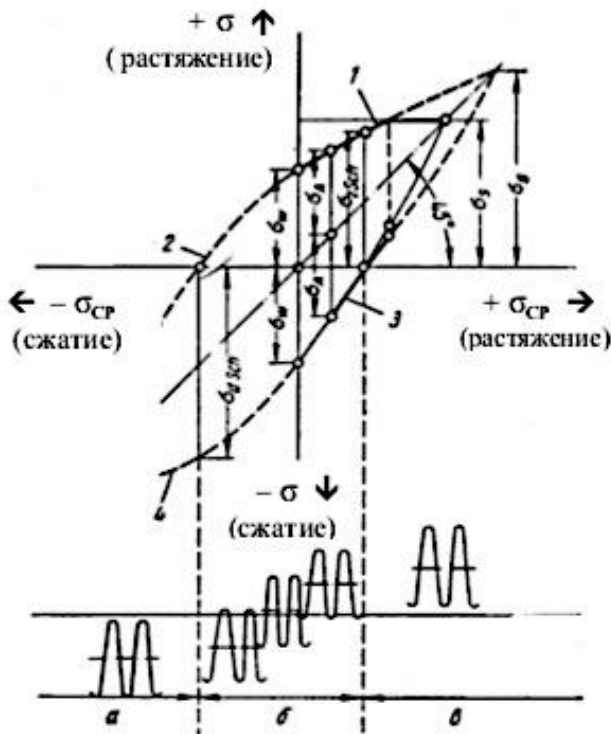


Рис. 2.12 – Диаграмма Смита для предела усталости:
а – область действия колеблющейся нагрузки; *б* – область действия знакопеременной нагрузки; *в* – область действия колеблющейся нагрузки (растяжение); 1 – линия верхнего предела напряжения для $+\sigma_{ср}$; 2 – линия нижнего напряжения для $-\sigma_{ср}$; 3 – линия нижнего предела напряжения для $+\sigma_{ср}$; 4 – линия верхнего предела напряжения для $-\sigma_{ср}$

Кроме диаграммы Смита можно упомянуть также диаграмму предела усталости по Хайгу (рис. 2.13), когда по

оси абсцисс также откладывают среднее значение напряжения σ_{CP} , а по оси ординат – величину амплитудного напряжения σ_a . В результате получают линию граничных значений амплитудного напряжения, точка пересечения которой с ординатой ($\sigma_{CP} = 0$) дает предел усталости по отношению к знакопеременной нагрузке, а точка пересечения ее с абсциссой ($\sigma_a = 0$) дает прочность на статическое растяжение σ_B .

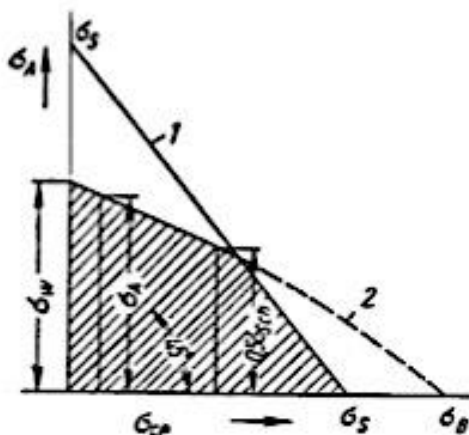


Рис. 2.13 – Диаграмма предела усталости по Хайгу:
 1 – прямая предела текучести σ_S ; 2 – граничная линия амплитуды напряжения σ_a

В диаграммах предела усталости по Герберу, Лаунгарду–Вейерауху, Рудмэну, Коммереллу, Резу и Полю приводится величина максимального напряжения. У последнего по оси абсцисс откладывают величину R , то есть отношение среднего напряжения к максимальному напряжению, и когда приложена статическая нагрузка, $R = 1$, а в

случаях знакопеременной и колеблющейся нагрузок $R = 0$ и $R = 0,5$ соответственно.

Если на усталостной диаграмме по Смиуту нанести линии, соответствующие одинаковым величинам R , то получится комбинация диаграмм усталости по Смиуту и Полю с семейством прямых линий, расходящихся из начала координат. Усталостной диаграмме по Полю аналогична усталостная диаграмма по Муру–Коммерсу–Ясперу, у которой по оси абсцисс откладывают отношение $S = \sigma_0/\sigma_H$ верхнего значения напряжения цикла нагрузки σ_0 к нижнему его значению σ_H , вследствие чего для случая статической нагрузки $S = +1$, а в случаях знакопеременной и колеблющейся нагрузок $S = -1$ и $S = 0$ соответственно.

Многоступенчатые испытания имеют большое значение, так как наиболее близко соответствуют реальным условиям эксплуатации деталей различных конструкций и механизмов, когда они подвергаются действию не двух определенных нагрузок (как при обычных испытаниях на усталостную прочность), а целой серии малоупорядоченных нагрузок. В этих сериях нагрузок большие их значения повторяются реже, а меньшие – чаще. Таким образом, следует стремиться к тому, чтобы условия испытаний были максимально приближены к реальным условиям эксплуатации (работы) деталей различных конструкций и механизмов. Для этого необходимо изучать реальные циклы усталостных нагрузок деталей различных узлов автомашин, самолетов и т.п.

Кривые усталости позволяют определять следующие критерии выносливости:

1) циклическую прочность – физический или ограниченный предел выносливости. Она характеризует несущую способность материала, то есть то наибольшее напряжение, которое он способен выдержать за определенно время эксплуатации (работы);

2) циклическую долговечность – число циклов (часов эксплуатации), которые выдерживает материал до образования усталостной трещины определенной протяженности или до усталостного разрушения при заданном напряжении. Долговечность может быть неограниченной (при $\sigma_{\max} < \sigma_{-1}$, где σ_{-1} – физический предел выносливости при симметричном цикле нагружения) и ограниченной (при $\sigma_{\max} > \sigma_{-1}$).

Для некоторых специальных случаев (имитация условий работы авиа- и автомобильных конструкций) применяют испытания на малоцикловую усталость. Их проводят при высоких напряжениях (выше $\sigma_{0,2}$) и малой частоте нагружения (обычно < 5 Гц). База таких испытаний не превышает $5 \cdot 10^4$ циклов нагружений.

Кривые усталости характеризуют стадию разрушения, но не отражают процессы, предшествующие разрушению. Более показательна обобщенная диаграмма усталости (рис. 2.14), которая содержит дополнительные штриховые линии, выделяющие в процессах усталости три стадии. Обобщенная диаграмма усталости позволяет установить, помимо физического или ограниченного предела вынос-

ливости (циклической прочности) и часов (циклов) эксплуатации материала, до образования усталостной трещины определенной протяженности или до усталостного разрушения при заданном напряжении (циклической долговечности), дополнительные критерии выносливости. Из них наиболее важное значение имеет живучесть, определяемая как *скорость роста трещины усталости (СРТУ)*. Живучесть характеризует способность материала работать в поврежденном состоянии после образования трещины (в области II, рис. 2.14).

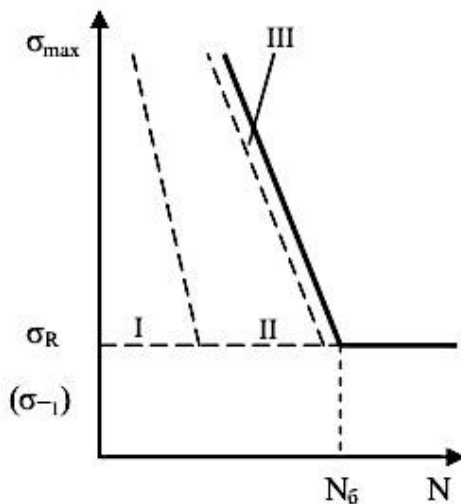


Рис. 2.14 – Обобщенная диаграмма усталостного разрушения (схема): I – стадия постепенного накопления повреждений до возникновения трещины усталости; II – стадия распространения трещины; III – стадия долома

Живучесть СРТУ – критерий надежности материала, позволяющий прогнозировать работоспособность детали,

рассчитанную на циклическую прочность по ограниченному пределу выносливости. При высокой живучести (малой величине $CPTU$) можно своевременно путем дефектоскопии обнаружить трещину усталости, заменить деталь и обеспечить безаварийную работу.

Циклическая долговечность и прочность зависят от большого числа факторов, из которых решающее значение имеют структура и напряженное состояние поверхностного слоя, качество поверхности и воздействие коррозионной среды. В отличие от кривой усталости 1 на воздухе (рис. 2.15), имеющей горизонтальный участок, соответствующий пределу выносливости σ_N для стали $\sigma_N \approx \sigma_B$), кривая усталости 2 в коррозионной среде по мере увеличения числа циклов непрерывно понижается, характеризуется отсутствием истинного предела выносливости и определяется так называемым условным пределом выносливости при заданной базе испытаний.

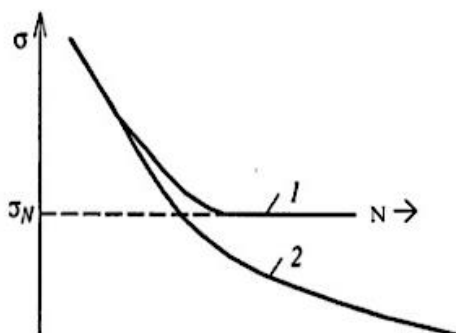


Рис. 2.15 – Кривые усталости металла на воздухе (1) и в коррозионной среде (2):
 σ – напряжение; N – число циклов нагружения;
 σ_N – предел выносливости на воздухе

Обычные конструкционные стали при базе испытаний $2 \cdot 10^7$ циклов снижают σ_N в условиях атмосферной коррозии до 20%, в пресной воде – до двух раз, в морской воде – вчетверо по сравнению с σ_N на воздухе. Обычно, чем прочнее сталь, тем сильнее снижается ее предел выносливости в коррозионной среде: для стали с пределом прочности $\sigma_B = 1000$ МПа он оказывается таким же, как для стали с пределом прочности $\sigma_B = 400$ МПа. Нержавеющие стали имеют более высокую коррозионно-усталостную прочность. Коррозионному повреждению подвержены все сплавы на основе Fe, Al, Ni, Cu и других металлов.

Термическая обработка сплавов изменяет предел их коррозионной усталости, представляющей собой разрушение металла в результате одновременного воздействия на металл циклических напряжений и коррозионной среды. В результате закалки с последующим отпуском значительно повышается усталостная прочность по сравнению с состоянием после отжига. Защита от коррозионно-усталостных разрушений путем применения покрытий особенно эффективна в сочетании с поверхностной обработкой (наклеп дробью, обкатка роликами, поверхностная закалка токами высокой частоты), при которой создаются благоприятные остаточные напряжения сжатия.

Наличие на поверхности остаточных напряжений сжатия затрудняет образование и развитие трещин усталости, что способствует увеличению предела выносливости. Резко отрицательное влияние оказывают напряжения растяжения и многочисленные концентраторы напряжений:

- а) конструктивные – галтели, отверстия, канавки и т.п.;
- б) технологические – следы механической обработки (риски и пр.), микронеровности поверхности (экструзия – выдавливание, интрузия – углубление полос скольжения);
- в) металлургические – внутренние дефекты (поры, раковины, экзогенные и эндогенные неметаллические включения – оксиды, сульфиды, силикаты, карбиды и др.).

Влияние концентраторов напряжений оценивают эффективным коэффициентом напряжений $K\sigma = \sigma_{-1}/\sigma_{-1k}$, под которым понимают отношение предела выносливости σ_{-1} гладкого образца к пределу выносливости σ_{-1k} такого же образца с концентратором напряжений.

Совместное влияние различных факторов на предел выносливости в расчетах оценивают коэффициентом

$$(K\sigma)_D = \sigma_{-1}/(\sigma_{-1k})_D = (K\sigma/\varepsilon_\sigma + 1/\beta_{-1})1/\beta_{упр},$$

показывающим во сколько раз предел выносливости σ_{-1} гладкого образца диаметром 10 мм больше предела выносливости $(\sigma_{-1k})_D$ детали. Здесь ε_σ – масштабный фактор, характеризующий уменьшение несущей способности детали при увеличении ее поперечного размера; β – коэффициент влияния шероховатости поверхности (в коррозионных средах заменяется на $\beta_{корр}$); $\beta_{упр}$ – коэффициент, характеризующий эффективность поверхностного упрочнения (наклеп дробью, обкатка роликами и др.).

Влияние факторов на несущую способность детали тем слабее, чем ближе к единице значение коэффициентов $K\sigma$, ε_σ , β и больше коэффициент $\beta_{упр}$.

Процесс постепенного разрушения поверхностных слоев материала путем отделения его частиц под влиянием сил трения называется изнашиванием, результат изнашивания – износом (рис. 2.16). Его определяют по изменению размеров (линейный износ), уменьшению объема (объемный или массовый износ).

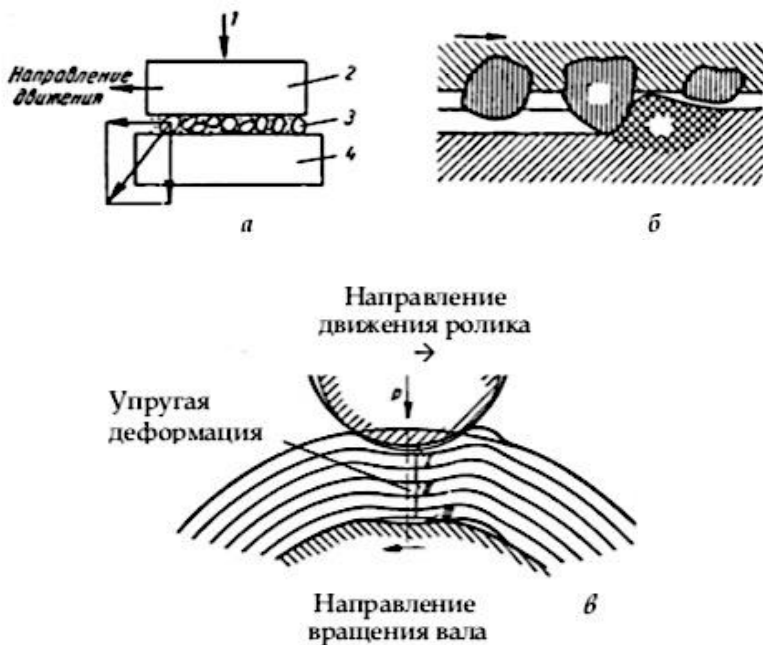


Рис. 2.16 – Схемы износа: общая (а), скольжением (б), качением (в); элементы, определяющие процесс износа: 1 – нагрузка, 2 – сопряженный металл, 3 – промежуточное вещество (частицы абразива, смазка и пр.), 4 – основной материал; I и III – зоны механико-физико-химического воздействия; II – зона механического воздействия

Свойство материала оказывать в определенных условиях трения сопротивление изнашиванию представляет

собой износостойкость. Износостойкость оценивают величиной, обратной скорости u_h или интенсивности J_h изнашивания, которые являются отношением износа соответственно ко времени или пути трения. Чем меньше значение скорости изнашивания u_h при заданном износе Δh , тем выше ресурс работы t узла трения:

$$t = \Delta h / u_h.$$

Различают по меньшей мере четыре элемента, которые определяют процесс износа (рис. 2.16, а). Если учесть возможные формы движения (скольжение, качение, удар, и пр.), то можно установить, что износ и скорость изнашивания зависят как от свойств веществ (основного, сопряженного, промежуточного), так и от условий эксплуатации, от времени. Существует три периода износа (рис. 2.17): I – начальный период (приработки), когда изнашивание протекает с постоянно замедляющейся скоростью; II – период установившегося (нормального) износа, для которого характерна небольшая и постоянная скорость изнашивания; III – период катастрофического износа.

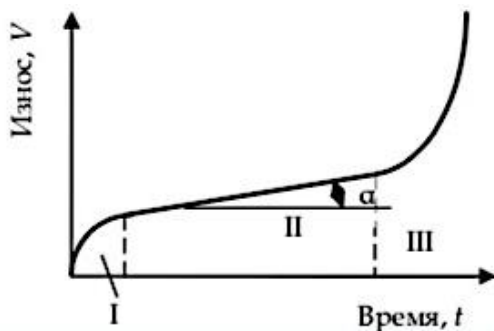


Рис. 2.17. Изменение износа во времени

Период приработки I подчиняется параболическому временному закону:

$$V = (2b \cdot t + V_0^2)^{0,5},$$

где V_0 – износ до начала приработки трущихся поверхностей; b – коэффициент пропорциональности: для большинства деталей машин (цилиндрические втулки, подшипники и т.д.) характерен износ, скорость которого dV/dt уменьшается с увеличением степени износа.

Величина износа V в процессе приработки занимает из-за своего затухания во времени особое положение, так как она благоприятно воздействует на эксплуатационные свойства соприкасающихся рабочих частей. Величина V_0 играет при этом значительно бóльшую роль, чем при шлифовке. Из практики известно, что для улучшения условий приработки цилиндрических вращающихся поверхностей предусматривают их бóльшую шероховатость (например, у дизельных двигателей).

В период II для различных материалов имеет место линейная временная зависимость установившегося (нормального) износа:

$$V = a \cdot t + V_{H1},$$

где V_{H1} – износ в конце приработки трущихся поверхностей; $a = dV/dt = \operatorname{tg} \alpha$ – коэффициент пропорциональности, равный тангенсу угла α наклона кривой износа. При этом характерно, что скорость износа не зависит от степени износа V и пары трущихся поверхностей. Величина V_H учитывает качество поверхности соприкасающихся рабочих частей.

Период катастрофического износа III подчиняется экспоненциальному временному закону:

$$V = V_{H2} \cdot e^{C \cdot t},$$

где V_{H2} – износ в конце периода II установившегося (нормального) износа, а значение C коэффициента пропорциональности можно получить из соотношения:

$$C = \ln (V_2 / V_1)$$

для отрезков времени $t_2 = t_1 + 1$.

Вызываемый разъеданием катастрофический износ очень опасен, для него характерен процесс самоускорения, его скорость dV/dt возрастает с увеличением степени износа $dV/dt = CV$ с коэффициентом пропорциональности C , величина которого зависит от очень большого числа факторов. Большую роль играют температура, сила сжатия соприкасающихся рабочих частей, скорость их движения и химического воздействия.

Ввиду того, что при работе всех машин происходят процессы трения, в которых участвуют соприкасающиеся рабочие части деталей, требование возможно бóльшей износостойкости очень важно. Развивающийся износ деталей машин очень уменьшает их эксплуатационную надежность. Обеспечение износостойкости связано с предупреждением катастрофического износа, уменьшением скоростей начального и установившегося изнашивания. Эта задача решается рациональным выбором материала трущихся пар и способа его обработки.

На практике встречается ряд систем, основанных на трении: тормозной барабан и тормозной башмак, вал и

подшипник и т.д. При этом возникает вопрос, в каком отношении находятся трение и износ? Экспериментально не найдено однозначного соответствия между наблюдаемым коэффициентом трения и степенью износа. Только при износе, обусловленном разъеданием, наблюдается в известных пределах линейная зависимость между трением и истиранием. Таким образом, износ из-за разъедания может быть с достаточной точностью определен из измерений трения. Во всех других случаях коэффициент трения не может быть применен в испытаниях на износ.

Долговечность деталей, работающих в условиях высоких температур, определяется скоростью ползучести – скоростью развития пластической деформации при постоянном (ниже предела текучести σ_T) напряжении. Ограничение скорости ползучести достигается применением жаропрочных материалов.

Таким образом, работоспособность материала детали в условиях эксплуатации характеризуют следующие критерии конструкционной прочности:

1) критерии прочности σ_B , $\sigma_{0,2}$, σ_{-1} , которые при заданном запасе прочности определяют допустимые рабочие напряжения и размеры деталей;

2) модуль упругости E , который при заданной геометрии детали определяет величину упругих деформаций, то есть ее жесткость;

3) критерии пластичности δ , ψ , ударная вязкость КСТ, КСВ, КСУ, вязкость разрушения K_{1C} , температурный порог

хладноломкости t_{50} , которые оценивают надежность материала в эксплуатации;

4) циклическая долговечность, скорости изнашивания, ползучести, коррозии, определяющие долговечность материала.

3. Методы повышения прочности конструкционных материалов

Высокая прочность и долговечность как свойство материала сопротивляться развитию постепенного разрушения с обеспечением в течение заданного промежутка времени (ресурса) работоспособности деталей при минимальной их массе и наибольшей надежности, как свойство материала противостоять хрупкому разрушению достигаются технологическими, металлургическими и конструкторскими методами.

Наибольшую эффективность имеют технологические и металлургические методы, цель которых – повышение механических свойств и качества металла.

Важнейшее из механических свойств – прочность материала, повышение которой при достаточном запасе пластических характеристик (δ , ψ) и вязкости (KCT, KCV, KCU, K_{1C} ,) приводит к снижению материалоемкости конструкций и в известной степени – к повышению ее надежности и долговечности.

Прочность – свойство материала, зависящее от энергии межатомной связи, структуры и химического состава.

Межатомные связи различаются в основном по характеру сил притяжения, так как энергия отталкивания, как правило, связана с деформацией электронных оболочек атомов и существенна только на расстояниях, меньших или равных диаметру атома (рис. 3.1). Энергия межатомного взаимодействия непосредственно определяет характеристики упругих свойств (модули нормальной упругости E и сдвига G – константы материала и структурно нечувствительны), а также так называемую теоретическую прочность (сопротивление разрыву межатомных связей).

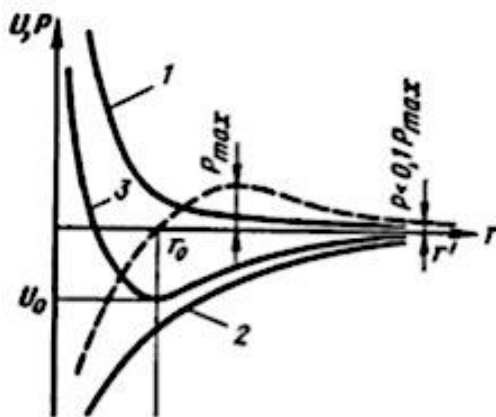


Рис. 3.1 – Изменение потенциальной энергии (U) при наличии только сил отталкивания (1), только сил притяжения (2), полной энергии (3) и силы взаимодействия пары атомов P (штриховая кривая) в зависимости от расстояния r между ними

Теоретическая прочность в реальных кристаллах из-за наличия структурных дефектов не достигается. Реальное сопротивление сдвигу

$$\sigma_{\max} = G/2\pi = 0,16 \cdot G$$

на два-три порядка (от 10^2 до 10^3) ниже теоретического и определяется не столько межатомными силами связи, сколько структурой материала.

Существенное различие теоретической и фактической (реальной) прочности металла привело к мысли о необходимости рассматривать не идеальный кристалл с правильным расположением атомов, а реальный, содержащий различные дефекты. В 1934 г., независимо друг от друга, Тейлором, Орованам и Поляни впервые введено представление о сдвиге (скольжении) одной части кристалла относительно другой посредством движения дислокации. Введение этого понятия было революционным для физики прочности и пластичности.

Уровень прочности (сопротивление пластической деформации) зависит главным образом от легкости перемещения дислокаций как основного механизма пластической деформации. В связи с этим современные методы повышения прочности материала основаны на создании такого его структурного состояния, которое обеспечивает максимальную задержку (скопление, блокировку, торможение) движения дислокаций (рис. 3.2).

Основными методами упрочнения материалов, в свете такого подхода, являются легирование, пластическая деформация, термическая и химико-термическая обработка. Повышение прочности материалов вышеупомянутыми методами основано на ряде структурных факторов, представленных ниже.

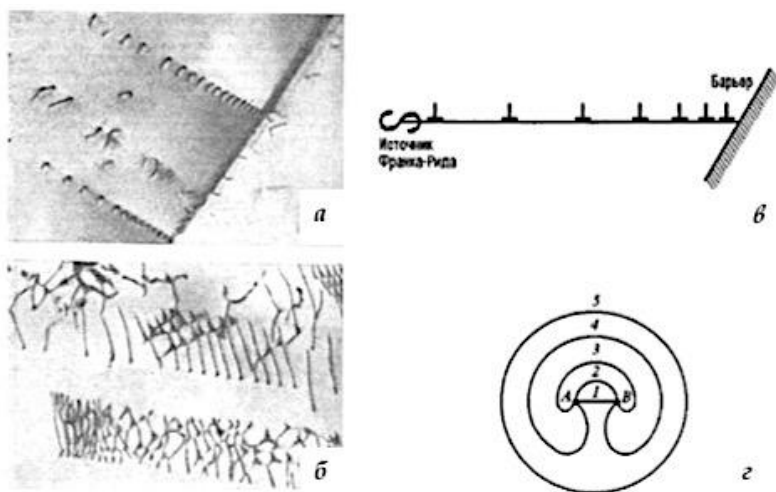


Рис. 3.2 – Скопление дислокаций и линии скольжения: *а* – в слабодеформированной аустенитной нержавеющей стали (НС), выявленные при просвечивании в электронном микроскопе тонкой фольги, $\times 22\ 000$; *б* – в НС после растяжения на 10%, $\times 40\ 000$; *в* – скопление дислокаций у барьера; *г* – размножение дислокаций по методу Франка–Рида

1. Увеличение плотности дислокаций – линейных дефектов кристаллического строения материалов. Силовые поля вокруг дислокаций являются эффективными барьерами для других, близкорасположенных дислокаций (рис. 3.3). В связи с этим, чем больше плотность дислокаций, тем выше сопротивление пластическому деформированию. Теория дислокаций дает следующую зависимость между пределом текучести σ_T и плотностью дислокаций ρ :

$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha \cdot b \cdot G \cdot \rho^{0,5},$$

где σ_0 – предел текучести до упрочнения (вследствие пластической деформации); α – коэффициент, учитывающий вклад других механизмов торможения дислокаций; b – вектор Бюргерса; G – модуль сдвига.

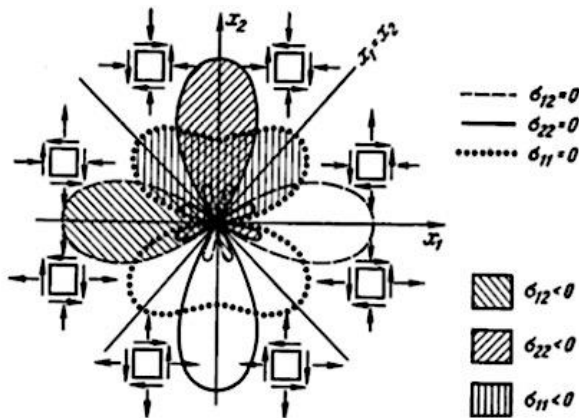


Рис. 3.3 – Линии одинакового уровня напряжений $\sigma_{ij} = 0$ ($i, j = 1, 2$) вокруг краевой дислокации с центром на пересечении осей x_1 и x_2 . Положительный вектор Бюргерса b (имеет величину порядка межатомных расстояний 10^{-8}) направлен вдоль оси x_1 . В каждой из восьми областей показаны схемы напряженного состояния

Увеличивать плотность дислокаций целесообразно до 10^{12} см^{-2} . При большем значении в силу неравномерности распределения структурных дефектов отдельные объемы материала пересыщаются дислокациями, что вызывает нарушение его сплошности в виде субмикроскопических трещин и, как следствие, снижение прочности.

2. Создание дислокационных барьеров в виде границ зерен, субзерен (измельчением зеренной структуры), дис-

персных частиц вторичных фаз (за счет термической обработки материала – закалки и старения) и пр. Препятствия на пути движения дислокаций требуют дополнительного повышения напряжений для их продвижения (переползания) и, тем самым, способствуют упрочнению. Роль эффективного барьера выполняют границы зерен и субзерен (блоков мозаики), которые являются областями несовершенного контакта, где имеются нарушения непрерывности кристаллической структуры (рис. 3.4).

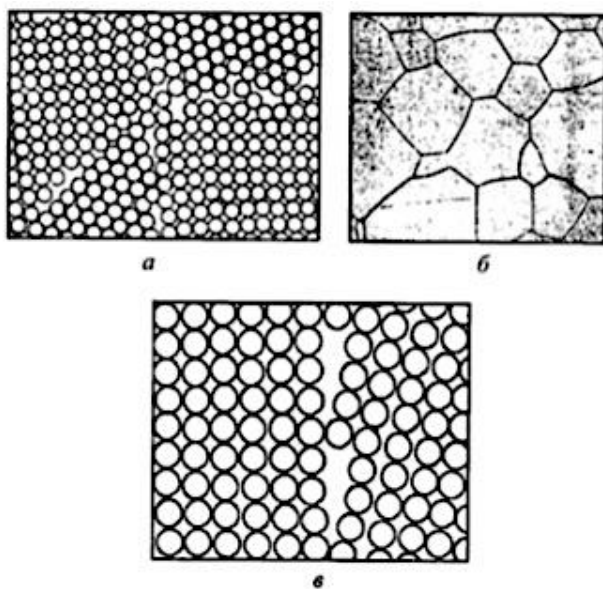


Рис. 3.4 – Границы зерен:
а – модель высокоугловой границы (угол разориентировки $\theta > 10^\circ$); *б* – зеренная структура молибдена ($\times 240$); *в* – модель малоугловой границы (угол разориентировки $\theta < 5^\circ$)

Соседние зерна в общем случае имеют несовпадающую кристаллографическую ориентировку, различие которой может быть от малоуглового с углом разориентировки $\theta < 5^\circ$ до высокоуглового с углом разориентировки $\theta > 10^\circ$. При переходе через высокоугловые границы происходит резкий скачок разориентировки атомных плоскостей. Скользящая дислокация вынуждена останавливаться у этих границ, поскольку в соседних зернах (субзернах) плоскость скольжения имеет другую ориентацию.

Повышение прочности при измельчении зерна (или субзерна) описывается уравнением Холла–Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k \cdot d^{-0,5},$$

где σ_0 – напряжение, необходимое для движения свободной (незаторможенной) дислокации; k – коэффициент, характеризующий прочность торможения (блокирования) дислокаций; d – диаметр зерна (субзерна).

Важная особенность этого фактора в увеличении прочности материала состоит в том, что измельчение зерна (увеличение протяженности их границ) сопровождается повышением ударной вязкости – качественной характеристики надежности материала. Объясняется это уменьшением размеров зародышевых трещин и затруднением их развития: трещина вынуждена при переходе от одного зерна к другому из-за несовпадений их кристаллографических ориентировок изменять направление движения, в результате чего ее траектория и сопротивление движению увеличиваются.

Сильное торможение движению дислокаций оказывают дисперсные частицы второй фазы. Такой фактор упрочнения характерен для гетерогенных сплавов, подвергнутых закалке и старению. В этом случае дислокации, перемещаясь в плоскостях скольжения, должны перерезать частицы, либо огибать их (рис. 3.5).

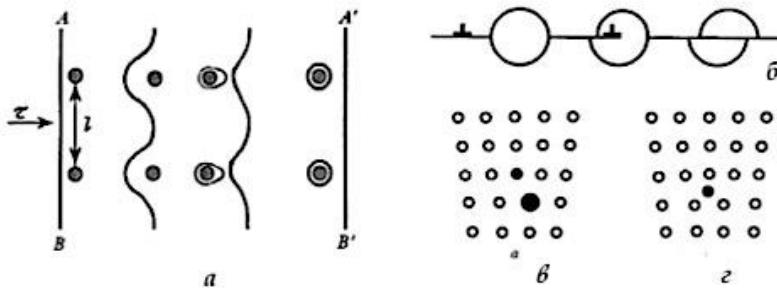


Рис. 3.5 – Прохождение дислокацией частиц второй фазы: путем огибания (а), перерезания (б) и образование атмосфер Коттрелла при наличии атомов замещения (б) и атомов внедрения (з)

Если частицы второй фазы расположены достаточно далеко друг от друга, а сами частицы некогерентны матрице (то есть когда определенные плоскости и направления кристаллической решетки матрицы имеют большой угол разориентировки), может реализоваться так называемый механизм огибания или механизм Орована. В этом случае дислокация под действием приложенного касательного напряжения τ проталкивается между частицами (рис. 3.5, а). Необходимое для этого напряжение составляет величину

$$\tau_{пр} = G \cdot b / l,$$

где l – расстояние между частицами.

Дислокация, огибая частицы, оставляет вокруг них дислокационные петли. При этом эффективное расстояние между препятствиями с каждым разом уменьшается и любой последующей дислокации приходится пробираться между частицами все с большим трудом. В результате будет возрастать сопротивление деформации и, как результат, материал упрочняется.

В тех случаях, когда частицы вторичной фазы дисперсны, близко расположены друг к другу и когерентны матрице (то есть когда определенные плоскости и направления кристаллической решетки матрицы имеют плавное и непрерывное продолжение в решетке выделения), может действовать механизм перерезания частиц вторичной фазы (рис. 3.5, б). При таком механизме упрочнение достигается по ряду причин:

- движению дислокаций препятствует поле упругих искажений вокруг включения, вторичной фазы;
- модуль сдвига частицы (как правило, карбид или интерметаллидное соединение) обычно больше, чем модуль матричного раствора;
- образуется новая поверхность раздела между частицей и матрицей;
- если выделение имело упорядоченную структуру, то для разупрочнения в плоскости скольжения для прохождения дислокации требуется дополнительная энергия.

Атомы замещения (рис. 3.5, в) и внедрения (рис. 3.5, г) стремятся собираться вблизи ядра дислокации, так как

энергия их упругого взаимодействия с собственным полем дислокации обратно пропорциональна расстоянию, образуя скопления, сегрегации. В области ядра дислокации чужеродным атомам легче размещаться, чем в совершенной области кристаллической решетки. Особенно большой вклад в упрочнение, скапливаясь на дислокациях, вносят атомы внедрения (C, O, H, N), которые сильнее связываются с дислокациями, чем атомы замещения. Такие скопления на дислокациях называются облаками (атмосферами) Коттрелла, образование которых сопровождается снижением искажений кристаллической решетки, предопределяя их устойчивость. Выход или отрыв атомов из *атмосферы Коттрелла* требует значительной энергии. Дислокация, связанная такими атмосферами, становится неподвижной или блокируется, что также способствует упрочнению материала. Вместе с тем следует учитывать, что повышение прочности, основанное на снижении подвижности дислокаций, сопровождается снижением пластичности, вязкости и, тем самым, надежности материала.

3. Образование полей упругих напряжений, искажающих кристаллическую решетку. Такие поля образуются вблизи точечных дефектов – вакансий, примесных атомов и, особенно, вблизи легирующих элементов (рис. 3.6). Межузельный атом (внедрения или дефект Френкеля, рис. 3.6, а) увеличивает межатомные расстояния у окружающих его атомов матрицы, смещая ближайших соседей на расстояние, равное 20% от межатомного, что приводит к более существенному повышению напряжений и деформа-

ций, чем при образовании вакансии (*дефект Шоттки*, рис. 3.6, б). Поэтому энергия возникновения вакансии в металле меньше, чем межузельного атома.

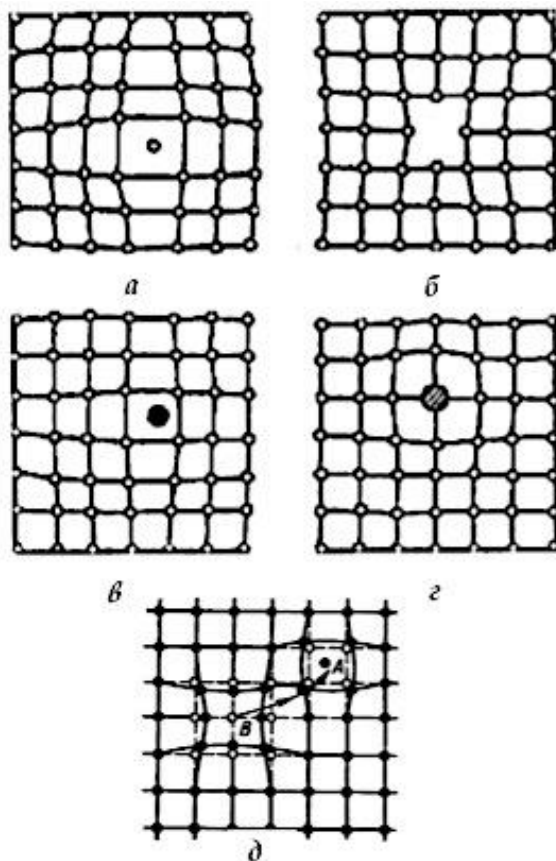


Рис. 3.6 – Виды искажения кристаллической решетки
вблизи точечных дефектов:
а – межузельный атом (внедрения или дефект Френкеля);
б – вакансия (дефект Шоттки); в – атом внедрения; з – атом
замещения; д – парный дефект Френкеля (дислоцирован-
ный атом А и вакансия В)

В плотноупакованных кристаллических решетках, которые характерны для большинства металлов, очень трудно образовываться межузельным атомам, и вакансии в кристаллах являются основными точечными дефектами (не считая примесных атомов). Вместе с тем под воздействием тепловых флуктуаций атомы, преодолев энергетический барьер, могут переходить на свободную поверхность кристалла или в междоузлие. Если в первом случае образуется только вакансия, то во втором случае происходит образование сразу двух точечных дефектов – вакансии и межузельного атома, такая комбинация называется *парный дефект Френкеля* (рис. 3.6, д).

Межузельный атом можно рассматривать как центр локального всестороннего упругого растяжения (*дефект Френкеля*, рис. 3.6, а), пустой узел (вакансия – *дефект Шоттки* (рис. 3.6, б) – как центр локального всестороннего упругого сжатия, а парный дефект Френкеля – как центр анизотропного напряженно-деформированного состояния. Напряжения и деформации вокруг таких центров убывают обратно пропорционально третьей степени расстояния от них. Заметные смещения атомов кристаллической решетки создаются на расстоянии одного-двух атомных диаметров. Быстрое затухание атомных смещений при удалении от центра точечного дефекта свидетельствует о том, что поля напряжений здесь *близкодействующие*.

В результате тепловых флуктуаций возможно не только увеличение возникновения точечных дефектов, но

и появление несовершенств кристаллической решетки иного происхождения – комплексов вакансий с дислокациями, резко ограничивающих подвижность последних, что способствует возрастанию прочности металла, увеличению сопротивления сдвигу. Так, монокристаллы алюминия, подвергнутые термической обработке, а именно, закалке в воду с температур, близких к температуре плавления, в испытаниях на растяжение обнаруживают критическое напряжение сдвига примерно в 5 раз большее, чем медленно охлажденные монокристаллы алюминия. Иным поведением отличается и поведение таких монокристаллов при пластической деформации, которая сопровождается возникновением многочисленных дефектов структуры, а следовательно, и эффектом упрочнения.

Резко увеличивает концентрацию дефектов типа Шоттки и Френкеля радиационное облучение металлов частицами с высокой энергией: быстрые частицы соударяются с атомами решетки и выбивают их из положения равновесия, образуя точечные дефекты; количество дефектов в этом случае зависит от энергии бомбардирующих частиц и природы кристалла. При облучении концентрация дефектов может достигать пересыщения, приводя к существенному изменению свойств металла.

На концентрацию дефектов типа Шоттки и Френкеля оказывает влияние и пластическая деформация. Концентрация вакансий в первом приближении растет пропорционально величине деформации и может быть определена зависимостью

$$n/N = (10^{-5} \div 10^{-6}) \cdot \varepsilon,$$

где ε выражено в процентах. Такие вакансии называются деформационными. Наибольшая их концентрация соответствует знакопеременному нагружению.

При совместном влиянии высоких температур и большой степени пластической деформации в процессах горячей обработки металлов давлением (ковки, прокатки, прессования, волочения и др.) концентрация вакансий может достигать $(5-10) \cdot 10^{-4}$, что дает концентрацию атомов, смещенных со своих мест, 2,5–5%. По-видимому, в этом случае вакансии могут оказывать влияние на механизмы пластической деформации и упрочнения, однако обычно влияние деформационных вакансий на прочность и пластичность металла невелико. Точечные дефекты, внесенные пластической деформацией и облучением, являются термодинамически неравновесными.

Упрочнение при легировании растет пропорционально концентрации легирующего элемента в твердом растворе и относительной разницы атомных радиусов компонентов (рис. 3.6, г). Как и при термической обработке, при легировании упрочнение преимущественно связано с образованием твердого раствора, гетерогенных структур различной дисперсности или метастабильных структур, например мартенсита. В итоге предел прочности и твердость повышаются. Это объясняется тем, что в неупорядоченном твердом растворе искажение области кристаллической решетки вокруг атомов растворенного элемента,

находящихся в плоскости скольжения, затрудняет продвижение дислокаций.

При образовании твердого раствора кристаллическая решетка всегда искажается и периоды ее изменяются, так как и электронное строение, и размеры атомов растворителя и растворенного компонента различны. При образовании твердого раствора замещения период решетки может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от соотношения радиусов растворителя и растворенного компонента. В случае твердого раствора внедрения период решетки всегда возрастает, поскольку твердые растворы внедрения образуются только в тех случаях, когда диаметр атома растворенного элемента невелик. При формировании твердого раствора внедрения кристаллическая решетка искажается более значительно, чем в случае формирования твердого раствора замещения.

Твердые растворы внедрения могут быть только ограниченной концентрации, поскольку число пор в узлах кристаллической решетки ограничено, а атомы основного компонента сохраняются в узлах решетки. Роль твердых растворов внедрения особенно значительна в сталях и чугунах.

В металлургии стали применяют различные легирующие элементы, присутствие которых в ее составе, кроме обычно содержащихся примесей (O, S и др.), придает ей особые механические и служебные свойства. Легирующими элементами могут служить металлы (Mn, Ni, Co, Cu и др.), металлоиды (C, S, P, N), ферросплавы (ферросили-

ций, феррохром, ферромарганец, ферроникель и др.) и лигатуры – вспомогательные сплавы, содержащие легирующий элемент, они могут обладать различной степенью растворимости и могут быть элементами, практически не растворимыми в железе (Pb, Ag, Bi).

По степени легированности различают три группы сталей. Суммарное содержание легирующих элементов в стали (не считая углерода) должно быть следующим: в низколегированной стали – менее 2,5%; в среднелегированной стали – от 2,5% до 10%; в высоколегированной стали – более 10%.

По числу компонентов легированные стали разделяют на группы:

1. Простые легированные (тройные) – это означает, что кроме железа и углерода в стали содержится только один легирующий элемент. Сталь называют по этому легирующему элементу, например, хромистая или никелевая сталь.

2. Легированные (четверные) – это означает, что кроме железа и углерода в стали содержатся два легирующих элемента (хромоникелевая или хромомолибденовая сталь).

3. Сложнолегированные – в стали содержится более двух легирующих элементов. Так, в быстрорежущую сталь одновременно входит несколько легирующих элементов. Для придания хромистым и хромоникелевым сталям высоких прочностных характеристик их дополнительно легируют вольфрамом.

Необходимым легирующим элементом в сталях мартенситного класса (стали 30X13, 40X13, 95X18 и др.) является углерод, где он обеспечивает высокие прочностные характеристики. В сталях других структурных типов углерод является вредной примесью – он образует карбиды хрома (типа $Cr_{23}C_6$), что снижает содержание хрома в сплаве. Улучшают механические свойства стали также микродобавки редких металлов (бор, цирконий и др.).

Таким образом, легированная сталь представляет собой железоуглеродистый сплав, свойства которого изменяют добавкой легирующих элементов.

Подбором химического состава стали, а также с помощью регулирования ее фазового состава, можно придать ей широкий диапазон свойств. Можно изменять прочность и вязкость, придавать стали нержавеющие свойства, жаростойкость, жаропрочность, окалиностойкость, износостойкость, существенно влиять на магнитные свойства. К менее дефицитным и более дешевым легирующим элементам относятся кремний, марганец и хром; к более дорогим – ванадий, вольфрам, молибден и др. Следует стремиться придавать стали желаемые свойства комбинированием ее состава из более дешевых элементов и определенной термической обработкой.

Легирование стали начинается еще в период плавления (в электрических и мартеновских печах, конвертерах) и заканчивается после выпуска из плавильной печи в сталеразливочном ковше или печь-ковше. Никель, медь и молибден обладают значительно меньшим сродством к

кислороду, чем железо, отчего их вводят в печь вместе с шихтой во время ее загрузки в печь или в периоды плавления и окисления; во время плавки эти элементы практически не окисляются. Молибден и никель иногда вводят в виде окислов – закиси никеля (NiO) и молибдата кальция (CaMoO_4). Эти окислы являются менее прочными соединениями, чем закись железа, поэтому они восстанавливаются железом даже в окислительный период плавки.

Вольфрам обладает бóльшим сродством к кислороду, чем железо, поэтому его вводят в виде ферровольфрама после удаления из печи окислительного шлака или в восстановительный период плавки.

Марганец и хром окисляются легче железа, поэтому ферромарганец и феррохром вводят в печь после удаления из нее окислительного шлака. Во время восстановительного периода плавки производят присадки ферромарганца и феррохрома для корректировки состава стали.

Кремний вводят в сталь в восстановительный период плавки; в процессе раскисления шлака его содержание в стали повышают до 0,25–0,35%. При выплавке специальных кремнистых сталей кремний для легирования вводят в сталь в виде 45- или 75%-ного ферросилиция, который дают в раскисленный металл за 25–30 мин до выпуска. Угар марганца, хрома и кремния зависит от состава стали и способа легирования и обычно находится в пределах 5–10%.

Ванадий, как и кремний, обладает большим сродством к кислороду; феррованадий вводят в раскисленный металл (после приведения в неактивное состояние раство-

ренного в жидкой стали кислорода) за 25–30 мин до выпуска. Угар ванадия составляет 5–8%.

Титан вводят в состав небольшого числа марок стали. Титан обладает очень большим сродством к кислороду; он окисляется не только закисью железа (FeO), но также и закисью марганца (MnO), окисью хрома (CrO) и кремнеземом (SiO_2). Поэтому ферротитан вводят непосредственно перед выпуском плавки; иногда ферротитан вводят в сталеразливочный ковш или печь-ковш. Угар титана составляет 40–60%.

Алюминий обладает наибольшим сродством к кислороду и легирование стали алюминием производят путем добавки слитков алюминия в печь, в сталеразливочный ковш или печь-ковш. При легировании стали алюминием уменьшается также степень загрязненности металла окисными и нитридными включениями. Однако в некоторых случаях алюминий, вводимый для раскисления стали, понижает механические свойства стали, уменьшает относительное удлинение δ , ударную вязкость КСЧ и предел прочности σ_B (рис. 3.7). Такое влияние алюминия связано с характером распределения сернистых неметаллических включений в стали. При содержании алюминия в стали менее 0,01% сера выделяется при ее затвердевании в виде окисульфидных включений, состоящих из двух фаз: окисной (FeO-MnO-SiO_2) и сульфидной (FeS-MnS). Эти включения могут коагулировать (рис. 3.8), поэтому в стали обычно содержится небольшое количество крупных окисульфид-

дов, располагающихся внутри зерна без определенной ориентации.

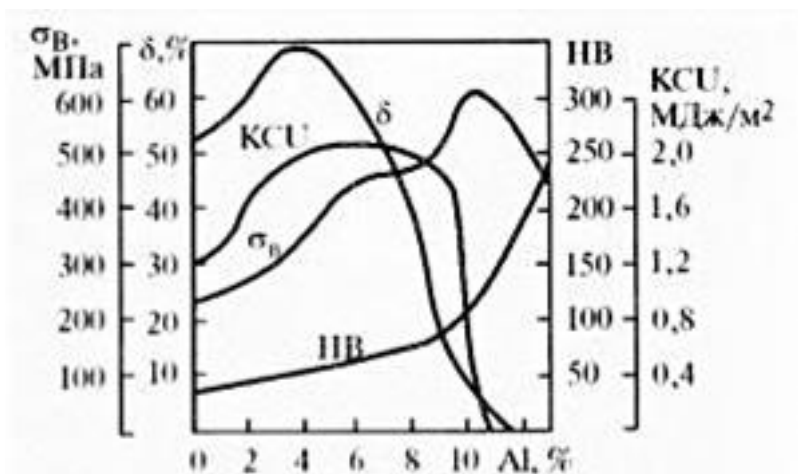


Рис. 3.7 – Влияние содержания алюминия в стали на ударную вязкость КСУ, относительное удлинение δ , предел прочности σ_B и твердость НВ

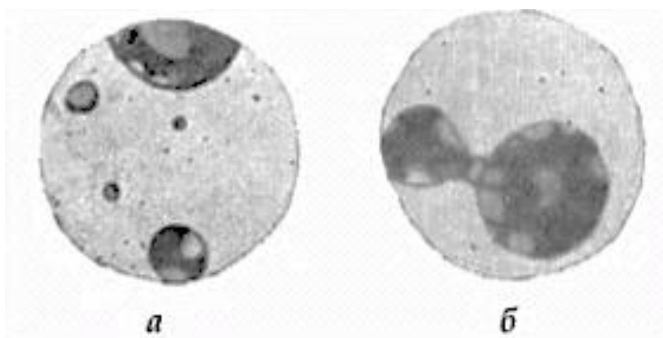


Рис. 3.8 – Оксисульфидные включения в литой стали (а) и их коагуляция (б) $\times 600$. Светлая составляющая – сульфидная фаза FeS–MnS; темная составляющая – окисная фаза FeO–MnO–SiO₂

Если сталь содержит алюминий в количестве около 0,02%, то кислород выделяется в стали в виде кристаллов корунда, а сера – по границам зерен в виде отличающейся низкой температурой плавления (988 °С) сложной эвтектики (Fe–FeS–MnS). Такие включения сульфидов оказывают наиболее вредное влияние на свойства стали, вызывая ее красноломкость: при горячей деформации границы зерен оплавляются и сталь хрупко разрушается. При более высоком содержании алюминия в стали (> 0,025%) кислород также выделяется в виде кристаллов корунда (глинозема), а сульфидные включения в виде граненых остроугольных кристаллов MnS–FeS, располагающихся в массе зерна без определенной ориентации. Эти включения менее вредны, чем эвтектические (Fe–FeS–MnS) по границам зерен.

При кристаллизации стали атомы элементов, формирующие твердые растворы внедрения, располагаются так, что возникает явление «избирательной» растворимости, т.е., если в данном участке среди атомов основной среды разместились атомы какой-либо примеси, то атомы другой примеси уже не могут размещаться в этом участке твердого раствора внедрения, поскольку эти «поры» в элементарной решетке уже заняты.

На рис. 3.9 показано влияние содержания растворенного в стали кислорода на растворимость в этой же стали водорода. И кислород, и водород способны формировать твердый раствор внедрения, причем чем больше «поры» в элементарных ячейках заняты атомами кислорода, тем труднее туда проникнуть атомам водорода. Воз-

можно, это является первопричиной неоднородного распределения примесей по объему металла, когда из-за отсутствия свободных мест в элементарных решетках начинается процесс ликвации примесей.

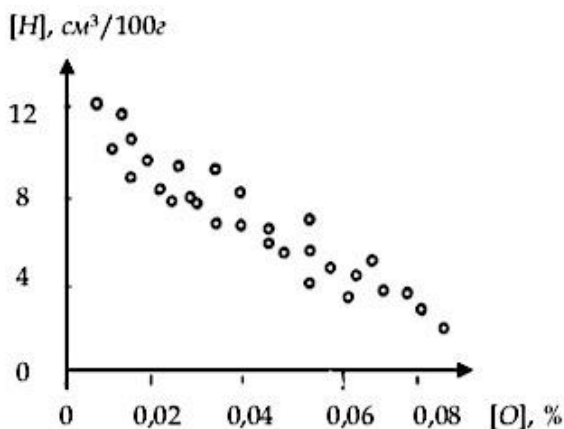


Рис. 3.9 – Влияние содержания кислорода на растворимость водорода в жидком железе

4. Методы повышения надежности конструкционных материалов

Проблема повышения конструкционной прочности состоит не столько в повышении прочностных свойств, сколько в том, как при высокой прочности обеспечить высокое сопротивление вязкому разрушению, то есть обеспечить высокую надежность конструкционного материала.

Закалкой на мартенсит и низким отпуском в углеродистых сталях можно получить при содержании 0,4%

углерода C величину предела прочности $\sigma_B \approx 2400$ МПа, при 0,6% C – $\sigma_B \approx 2400$ МПа. Однако при такой прочности эти стали обнаруживают высокую хрупкость ($KCT \approx 0$), ненадежны с позиции эксплуатации, а также конструктивной эффективности.

Задаваемые характеристики прочности, надежности, долговечности машиностроительных деталей достигаются формированием определенного структурного состояния конструкционного материала, которое должно сочетать эффективное торможение дислокаций с их равномерным распределением в объеме материала либо, что особенно благоприятно, допускать определенную подвижность скапливающихся у барьеров дислокаций. Эти требования исходят из того, что хрупкое разрушение инициируют скопления дислокаций критической плотности, например, у непроницаемых барьеров, вследствие чего возникают опасные локальные напряжения. Их релаксация идет двумя путями:

1. Образование зародыша хрупкой трещины, прорыв и эстафетная передача дислокации в смежные области.

2. Пластическая релаксация локальных напряжений.

Первый путь является инициатором снижения надежности и долговечности, внезапного отказа деталей в условиях эксплуатации. Второй путь возможен при наличии, по меньшей мере, полунепроницаемых барьеров, в качестве которых, в частности, выступают малоугловые границы – границы субзерен.

Формированию благоприятной структуры и обеспечению надежности способствуют рациональное легирование, измельчение зерна, повышение металлургического качества.

Рациональное легирование предусматривает введение в сталь и сплавы нескольких элементов при невысокой концентрации каждого из них с тем, чтобы повысить не только прочностные характеристики, но и пластичность, и вязкость. Измельчение зерна осуществляется легированием и термической обработкой, особенно при использовании высокоскоростных способов нагрева – индукционного или лазерного.

Наиболее эффективное измельчение субструктуры достигается при термомеханической обработке (ТМО), сочетающей пластическую деформацию стали в аустенитном состоянии с ее закалкой и низкотемпературным отпуском. При этом принципиальной особенностью является формирование структуры, а следовательно, и свойств закаленной стали. При ТМО это происходит в условиях повышенной плотности и оптимального распределения дефектов кристаллической решетки (дислокаций), обусловленных наклепом. Различают 2 основных типа ТМО (рис. 4.1). По первому способу, называемому *высокотемпературной термомеханической обработкой* (ВТМО), сталь деформируют со степенью деформации 20–30% при температуре выше точки А₃, при которой сталь имеет аустенитную структуру. После деформации производится немедленная закалка во избежание развития процесса рекристаллиза-

ции – зарождения и роста новых, чаще всего равноосных, зерен, с меньшим количеством дефектов строения. В процессе закалки наклепанный при деформации аустенит превращается в мартенсит. Затем следует реализация низкотемпературного отпуска (100–300 °С).

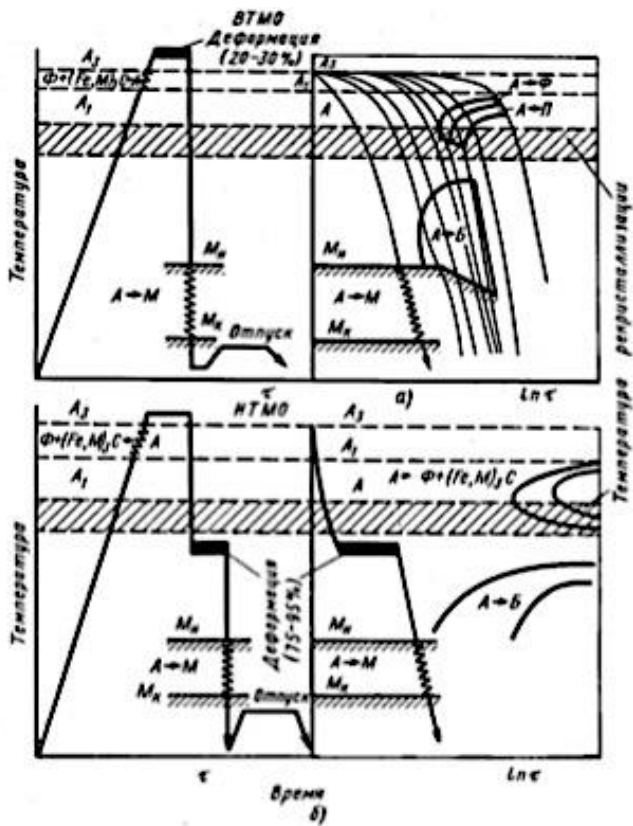


Рис. 4.1 – Схема термомеханической обработки стали:
 а – ВТМО; б – НТМО

По второму способу, называемому *низкотемпературной термомеханической обработкой* (НТМО), сталь

деформируют в температурной зоне существования относительной устойчивости переохлажденного аустенита (400–600 °С, выше точки Мн, но ниже температуры рекристаллизации, рис. 4.1, б). Степень деформации обычно составляет 75–95%. Закалку осуществляют сразу после деформации с последующим низкотемпературным отпуском (100–300 °С), как и в случае ВТМО. ТМО позволяет получать высокую прочность ($\sigma_B = 220\text{--}300 \text{ кгс/мм}^2$) при хороших показателях пластичности ($\delta = 6\text{--}8\%$) и вязкости и ($a_n = 5\text{--}6 \text{ кгс}\cdot\text{м/см}^2$), тогда как после обычной закалки и низкого отпуска (без деформации в аустенитной области) σ_B не превышает 200–220 кгс/мм² и $\delta = 3\text{--}4\%$. Очень важно, что с повышением прочности при ТМО одновременно возрастает пластичность.

Наибольшее упрочнение $\sigma_B = 260\text{--}300 \text{ кгс/мм}^2$ достигается при деформации переохлажденного аустенита (рис. 4.1, б), то есть при НТМО. Деформация в области высоких температур (ВТМО) не создает столь высокого предела прочности, достигая значений лишь $\sigma_B = 220\text{--}240 \text{ кгс/мм}^2$, что объясняется тем, что при высоких температурах не удается избежать хотя бы частичной рекристаллизации, по меньшей мере динамической. НТМО можно рассматривать как холодную обработку давлением, так как она проводится ниже температуры рекристаллизации. Высокие механические свойства после термической обработки в процессах ВТМО и НТМО объясняются большой плотностью дислокаций в мартенсите, дроблением его кристаллов на отдельные субзерна (блоки) величиной в доли

микрона с взаимной разориентировкой вплоть до высокоугловой до 10–15 °С. Дислокационная структура, формирующаяся в аустените при деформации «наследуется» мартенситом. После деформации аустенита последующая закалка приводит к плотным скоплениям дислокаций, сочленяющих сильно разориентированные фрагменты мартенсита. В образующейся субструктуре дислокации связаны в стабильные конфигурации (фрагменты), а субграницы выполняют роль полупроницаемых барьеров. Повышение пластичности связано, вероятно, со снижением напряжений II рода.

В сравнении ВТМО и НТМО следует учитывать такой важный фактор ВТМО, как обеспечение при ВТМО большего запаса пластичности и лучшей конструктивной прочности, повышенной ударной вязкости при комнатной и низких температурах, пониженного порога хладноломкости и чувствительности к отпускной хрупкости. Кроме того, деформация при высоких температурах ВТМО протекает при меньших усилиях, вызывает меньший износ оборудования и является поэтому более технологичной операцией. Наиболее промышленно освоенным способом является схема ВТМО (рис. 4.2).

Более надежной работе высоконапряженных деталей способствует повышение чистоты металла, его металлургического качества. При равной прочности более чистый металл обладает более высоким сопротивлением вязкому разрушению и более низким порогом хладноломкости. Повышение чистоты стали связано с удалением вред-

ных примесей – серы, фосфора, газообразных элементов – кислорода, водорода, азота и зависящих от их содержания неметаллических включений – оксидов, сульфидов и др.

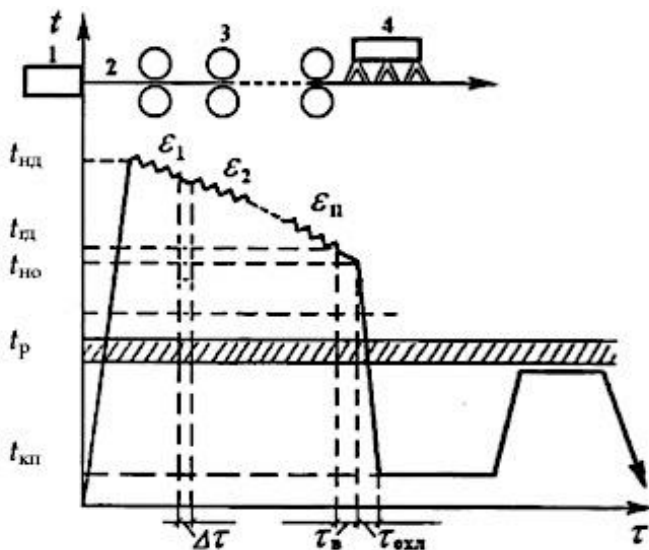


Рис. 4.2 – Схема основных технологических параметров ВТМО:

- 1 – нагревательная печь; 2 – заготовка;
- 3 – прокатный стан; 4 – спрейер (охлаждающее устройство)

Неметаллические включения, серу и газообразные примеси, удаляют из металла рафинированием синтетическими шлаками и в процессе переплава (рис. 4.3). В промышленности применяют несколько способов переплава: вакуумно-дуговой (ВДП), электронно-лучевой (ЭЛП), электрошлаковый (ЭШП), а также вакуумно-индукционную плавку (ВИ). При ВДП металл наиболее полно очищается от растворенных газов, сера практически не удаляется. При

рафинировании синтетическими шлаками и ЭШП, наоборот, наиболее полно удаляется сера.

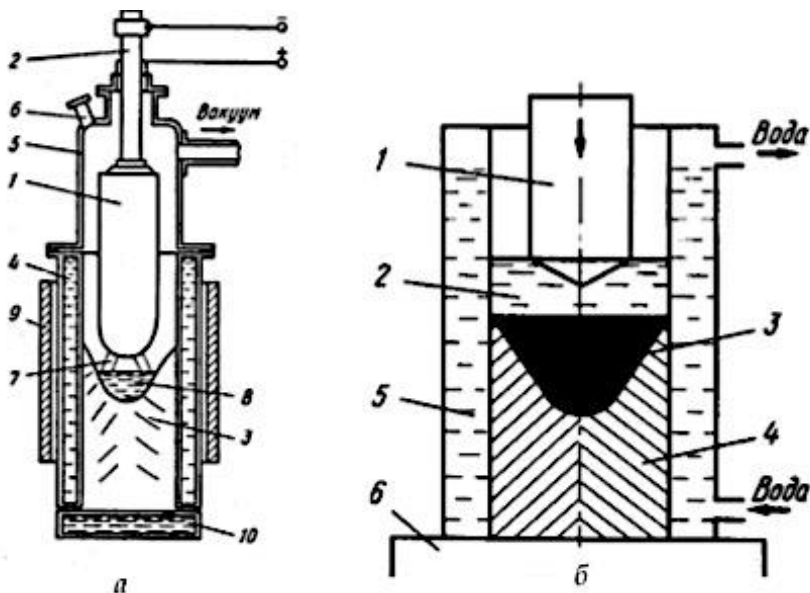


Рис. 4.3 – Вакуумно-дуговая печь для получения слитков в водоохлаждаемом кристаллизаторе (а) и схема электрошлакового переплава (б):

Для а): 1 – расходимый электрод; 2 – шток; 3 – слиток; 4 – водоохлаждаемый кристаллизатор; 5 – крышка с «гляделькой»; 6; 7 – электрическая дуга; 8 – ванна жидкого металла; 9 – соленоид; 10 – водоохлаждаемый поддон. Для б): 1 – расходимый электрод; 2 – шлаковая ванна; 3 – металлическая ванна; 4 – слиток; 5 – кристаллизатор; 6 – поддон

Для повышения циклической прочности и износостойкости важно затруднить деформацию поверхности деталей. Это достигается технологическими методами поверхностного упрочнения: поверхностной закалкой, химико-термической обработкой (азотированием, цементацией

и пр.), поверхностным пластическим деформированием (обдувкой дробью, обкаткой роликами и пр.).

Конструкторские методы предусматривают обеспечение равнопрочности высоконапряженных деталей. При их проектировании избегают резких перепадов глубоких канавок, галтелей малого радиуса и других конструктивных надрезов. Если этого избежать нельзя, то для смягчения концентрации напряжений применяют местное упрочнение для формирования остаточных напряжений сжатия.

Таким образом, технологические и металлургические методы повышения конструкционной прочности сталей и сплавов включают:

1) методы упрочнения, вызывающие увеличение плотности дислокаций и уменьшение их подвижности;

2) методы обеспечения необходимого запаса пластичности и вязкости, предусматривающие более равномерное распределение дислокаций, а также очистку от охрупчивающих конструкционный материал примесей. Арсенал структурных факторов, используемых в группе металлургических методов, определяет следующий ряд уровней статической прочности в конструкциях разного назначения:

- для сталей $\sigma_B = 1600\text{--}2200$ МПа;
- для титановых сплавов $\sigma_B = 1000\text{--}1250$ МПа;
- для алюминиевых сплавов $\sigma_B = 550\text{--}600$ МПа.

Принципиально иной способ достижения высокой конструкционной прочности использован в новом классе высокопрочных материалов – в композиционных мате- ри-

алах, представляющих собой композицию из мягкой матрицы и высокопрочных волокон. Высокопрочные волокна армируют матрицу и воспринимают всю нагрузку. Матрица нагружена слабо и служит для передачи и распределения нагрузки между волокнами.

Композиционные материалы отличаются высоким сопротивлением распространению трещин, так как при их образовании, например из-за разрушения волокна, трещины «вязнут» в мягкой матрице. Композиционные материалы, использующие высокопрочные и высокомодульные волокна и легкую матрицу, могут обладать высокими показателями удельной прочности и жесткости.

5. Коррозионная стойкость конструкционных материалов

5.1. Основные понятия и определения

Слово «коррозия» означает разъесть (от латинского *corrodere*). Коррозией называют самопроизвольное разрушение металлов в результате химических и электрохимических взаимодействий с внешней средой. Частным случаем коррозии является ржавление, представляющее собой коррозию железа и его сплавов с образованием продуктов коррозии (ржавчины). Цветные металлы и сплавы не ржавеют, а корродируют. В результате коррозии изменяются свойства металла и часто происходит ухудшение его функциональных свойств. Металл в результате коррозии может частично или полностью разрушаться. Водо-

родная коррозия или коррозионная хрупкость – потеря металлом прочности и пластичности в результате наводороживания металла. Водородной коррозии подвержена сталь в средах, содержащих сероводород (например, в сырой нефти).

Способность металлов сопротивляться воздействию среды называется *коррозионной стойкостью* или *химическим сопротивлением материала*.

Коррозия – это физико-химическим процесс и закономерности ее протекания определяются общими законами термодинамики и кинетики гетерогенных систем. Различают внутренние и внешние факторы коррозии, последние из которых характеризуют влияние природы металла или сплава (состава, структуры и пр.) на вид и скорость коррозии, а также определяют влияние состава коррозионной среды и условия протекания коррозии (температура, давление, агенты – кислоты, щелочи и пр.).

Коррозионный процесс – обычная гетерогенная реакция, то есть реакция, протекающая на границе двух фаз: с одной стороны, это металл или сплав, с другой стороны, агрессивная среда.

5.2. Классификация коррозионных процессов

Коррозионные процессы классифицируют по:

- механизму взаимодействия металлов с внешней средой;
- характеру коррозионных разрушений;
- условиям протекания коррозионного процесса;

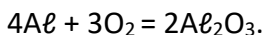
– видам дополнительных воздействий, которым подвергается металл одновременно с влиянием коррозионной среды.

По механизму коррозионного процесса различают химическую и электрохимическую коррозию.

Химическая коррозия – это взаимодействие металла или сплава с коррозионной средой, при котором окисление металла и восстановление окислительной компоненты коррозионной среды протекают в одном акте. Так окисляется большинство металлов в газовых средах, содержащих окислители (например, окисление в воздухе при повышенных температурах):



или



Электрохимическая коррозия – это взаимодействие металла с коррозионной средой (раствором электролита), при котором ионизация атомов металла и восстановление окислительной компоненты среды протекают не в одном акте, и их скорости зависят от электродного потенциала металла. По такому механизму, например, взаимодействуют металлы с кислотами:



Эта суммарная реакция состоит из двух актов:



По характеру коррозионного разрушения различают общую (сплошную) и местную коррозию (рис. 5.1). Общая или сплошная коррозия поражает всю поверхность метал-

ла (рис. 5.1, а–в). Ее делят на равномерную (рис. 5.1, а) неравномерную (рис. 5.1, б) и избирательную (рис. 5.1, в), при которой коррозионный процесс распространяется в основном по какой-либо структурной составляющей сплава (обесцинкование латуни, графитизация чугуна и др.).

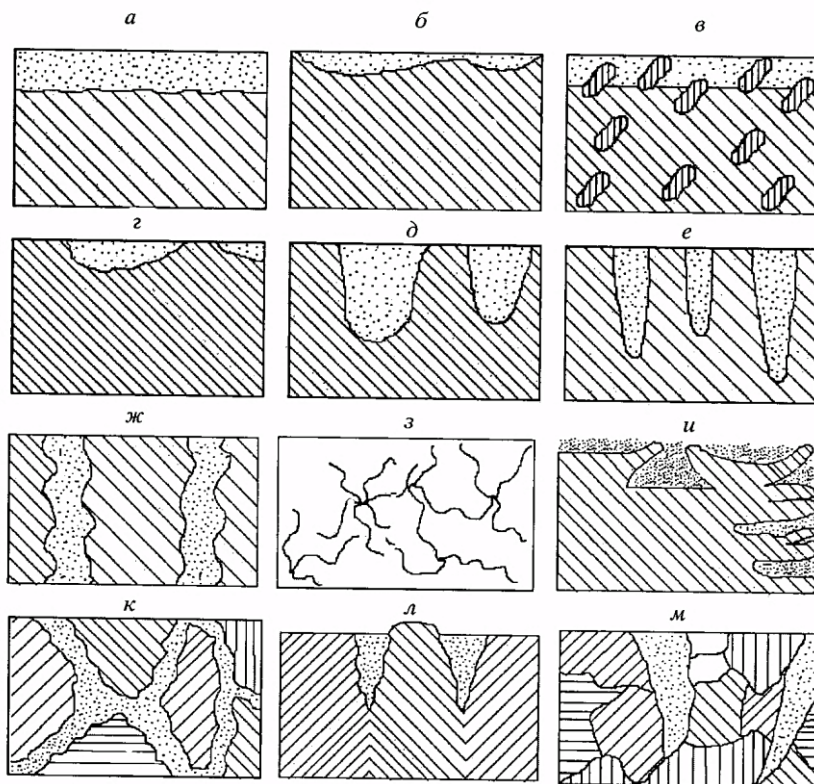


Рис. 5.1 – Основные типы коррозии металлов: а – равномерная; б – неравномерная; в – избирательная; г – пятнами; д – язвами; е – точечная (питтинговая, от англ. pit – точка); ж – сквозная; з – нитевидная; и – подповерхностная; к – межкристаллитная; л – ножевая; м – коррозионное растрескивание

Коррозия ножевая – коррозия по границам сварных швов, имеет вид надреза ножом (рис. 5.1, л).

Коррозия питтинговая – коррозия на участках малой площади, достигающая значительной глубины (рис. 5.1, е).

Коррозия подповерхностная – коррозионное разрушение начинается на поверхности металла, но затем распространяется в глубине металла таким образом, что продукты коррозии оказываются сосредоточенными в полостях внутри металла (рис. 5.1, и). Этот вид коррозии вызывает вспучивание и расслоение металлических изделий.

Коррозия под напряжением – вид коррозии металла, находящегося под механическим напряжением, вследствие образования в нем микронеплотностей.

Коррозия послойная – коррозия, развивающаяся в деформированном металле, имеющем строчную структуру, по отдельным структурным составляющим.

Коррозия пятнистая – повреждение поверхности коррозией в виде отдельных пятен небольшой глубины (рис. 5.1, г).

Коррозия сплошная – охватывает всю поверхность металла, находящуюся под воздействием данной коррозионной среды. Сплошная коррозия может быть равномерной (рис. 5.1, а), если процесс протекает с одинаковой скоростью по всей поверхности металла (например, коррозия углеродистой стали в растворах серной кислоты), и неравномерной (рис. 5.1, б), если скорость процесса неодинакова на различных участках поверхности (например, коррозия углеродистой стали в морской воде).

Коррозия щелевая – коррозия, развивающаяся в узких щелях и неплотностях, под прокладками, в зазорах, резьбовых креплениях и т.д. (рис. 5.2). Щелевая коррозия является вторым по распространенности видом повреждения сталей после точечной коррозии.



Рис. 5.2 – Щелевая коррозия

Коррозия язвенная – коррозия на небольших участках поверхности большей глубины, чем при пятнистой коррозии (рис. 5.3).

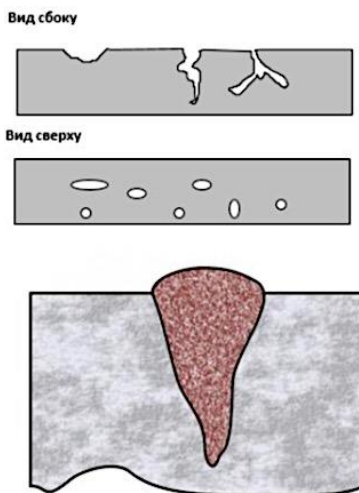


Рис. 5.3 – Язвенная коррозия

С позиций конструкционной прочности материалов изделий, агрегатов и конструкций очень опасным видом разрушения является коррозионное растрескивание, представляющее собой локализацию коррозионного процесса в виде узкой трещины, распространяющейся либо межкристаллитно, либо транскристаллитно. Ему подвержено большинство высокопрочных сталей в хлоридсодержащих средах. Высокую склонность к коррозионному растрескиванию проявляют алюминиевые, магниевые и медные сплавы в ряде сред.

По условиям протекания процесса коррозии наибольшее распространение получила классификация ее видов, представленная на рис. 5.4, а по видам дополнительных воздействий, которым подвергается металл одновременно с действием коррозионной среды – на рис. 5.5.



Рис. 5.4 – Классификация видов коррозии по условиям протекания коррозионного процесса

5.3. Химическая коррозия

Химическая коррозия металлов – это самопроизвольный окислительно-восстановительный процесс, подчиняющийся законам гетерогенных химических реакций, которые осуществляются в одном акте в точке взаимодействия металла с компонентом агрессивной среды.



Рис. 5.5 – Классификация коррозии по видам дополнительных воздействий одновременно с действием коррозионной среды

Металл в процессе химической коррозии выступает в роли восстановителя, он отдает электроны и окисляется. Компонент агрессивной среды выступает в роли окислителя, акцептора электронов (принимает электроны и восстанавливается). В роли окислителей могут быть O_2 , Cl_2 , HCl , SO_2 , CO_2 и др.

Химическая коррозия наблюдается при действии на металлы сухих газов (воздуха, продуктов горения топлива и др.) и жидких неэлектролитов (нефти, бензина и др.) и является гетерогенной химической реакцией жидкой или газообразной среды с металлами.

Область существования газовой коррозии определяется интервалом температур, нижняя граница которого соответствует температуре конденсации пара на поверхности металла. Это состояние, называемое «точкой росы», зависит от парциального давления паров воды и при атмосферном давлении оценивается величиной температуры 240–250 °С, а для отходящих газов теплоэлектростанций – 90–100 °С. Верхняя температурная граница определяется такими свойствами металла, как жаростойкость и жаропрочность.

Жаростойкость характеризует способность металла сопротивляться коррозионному воздействию газов при высоких температурах.

Жаропрочность определяет способность материала в условиях высокотемпературного воздействия сохранять такие механические свойства, как длительная прочность и сопротивление ползучести. Металл может быть жаростоек, но не жаропрочен, и наоборот – жаропрочен, но не жаростоек.

Жаропрочные стали на основе железа можно эксплуатировать при температурах до 700 °С, алюминиевые и медные сплавы – до 400–450 °С, свинец – до 150 °С. Эффективное сочетание жаропрочности и жаростойкости достигается в сплавах системы «никель – хром» – до 1000 °С.

Газовая коррозия имеет место при работе многих металлических деталей и механизмов, аппаратов (двигателей внутреннего сгорания, газовых турбин, аппаратов синтеза аммиака, арматуры нагревательных печей), при горячей

обработке металлов давлением. Образование продуктов коррозии осуществляется в результате протекания ряда параллельных и последовательных реакций. На рис. 5.6 представлена схема образования сплошной окисной пленки толщиной h при окислении металла кислородом из газовой фазы.

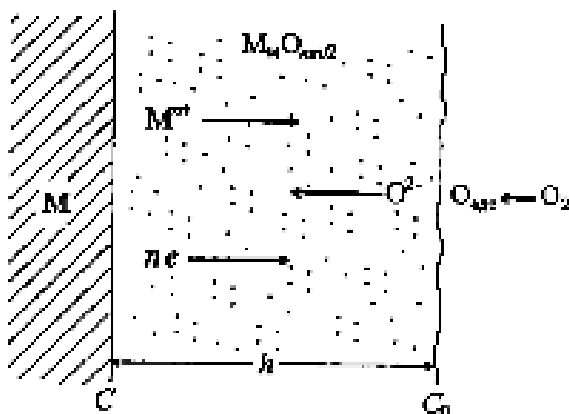


Рис. 5.6 – Схема образования сплошной окисной пленки толщиной h на металле

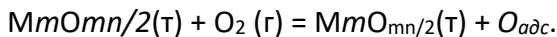
Процесс окисления металла происходит в несколько стадий:

1. Переход металла в форме ионов и электронов из металлической фазы в слой оксида:

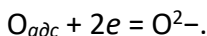


2. Перемещение ионов металла M^{n+} и электронов ne в слое оксида $M_mO_{mn/2}$.

3. Перенос кислорода O_2 из газового потока к поверхности раздела «оксидная пленка-газ» и адсорбция кислорода $O_{адс}$ на поверхности:

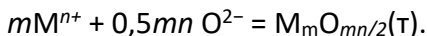


4. Ионизация адсорбированного кислорода:



5. Перемещение ионов кислорода O^{2-} в слое оксида $M_m O_{mn}/2$.

6. Реакция образования оксида: $\left[\begin{matrix} \text{L} \\ \text{SEP} \end{matrix} \right]$



В некоторых случаях отдельные стадии процесса могут выпадать или трансформироваться, но, в общем и целом, все стадии процесса взаимосвязаны и протекают последовательно. Скорость процесса определяется скоростью самой медленной реакции. Если медленно протекает стадия 3, то процесс лимитируется внешней диффузией, если 1, 2 или 5 – имеет место диффузионный контроль процесса образования оксидной пленки.

Нарастание пленки (рост толщины h) для ряда технически важных металлов (при окислении W, Cu, Fe, Ni, а также при образовании галогенидных пленок на серебре) подчиняется параболическому закону (рис. 5.7):

$$h^2 = 2 K_d C_0 \tau,$$

где K_d – коэффициент диффузии реагентов через нарастающую пленку оксидов; C_0 – концентрация кислорода на внешней поверхности оксидной пленки на границе с воздухом; τ – время окисления металла.

Для ряда металлов (алюминия, хрома, кремния и цинка) установлена логарифмическая зависимость скорости окисления от времени τ :

$$h = \ell n (K\tau)$$

с константой K . Имеют место также сложно-параболический и линейный (щелочные и щелочноземельные металлы, Mo, Os, Ru, Ir, V, W) ход зависимости нарастания оксидной пленки h .

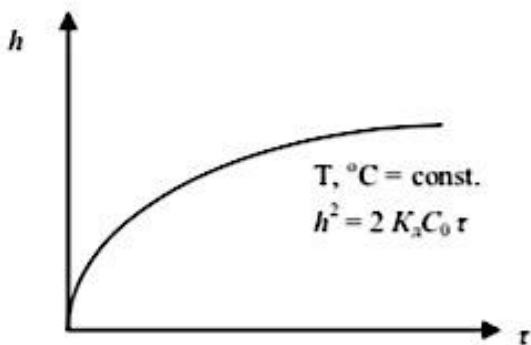


Рис. 5.7 – Параболический ход зависимости толщины h оксидной пленки для меди

Влияние состава газовой среды (O_2 , H_2O , SO_2 и CO_2) и температуры на газовую коррозию некоторых металлов, используемых для изготовления деталей, узлов, конструкций и аппаратуры, показано на рис. 5.8.

Железо обнаруживает достаточно высокую скорость коррозии во всех газовых средах, значительно увеличивающуюся в интервале температур 700–900 °С. Высокой жаростойкостью во всех четырех (O_2 , H_2O , SO_2 и CO_2) средах обладает хром. Никель, относительно устойчивый в газовой среде O_2 , H_2O , CO_2 очень сильно корродирует в атмосфере SO_2 . Кобальт наибольшую скорость коррозии имеет в среде SO_2 , которая значительно возрастает при приближении к температуре 900 °С. Медь наиболее быстро

корродирует в атмосфере O_2 , но устойчива в атмосфере SO_2 .

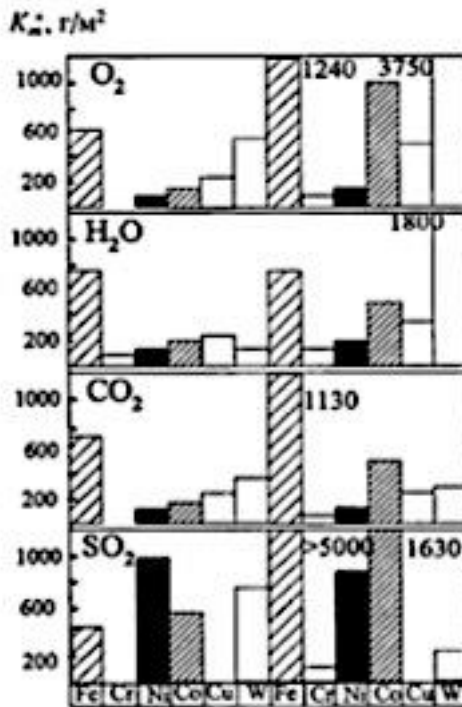


Рис. 5.8 – Газовая коррозия некоторых металлов в среде O_2 , H_2O , CO_2 , SO_2 при 700 и 900 °C за 24 часа

Коррозия в неэлектролитах – это коррозия в жидкостях, не проводящих электрический ток. К неэлектролитам относятся жидкое топливо (бензин, керосин, нефть), смазочные масла, многие органические вещества – бензол, хлороформ, фенол, четыреххлористый углерод. Так при окислении смазочного масла возрастает его кислотность и коррозионная активность. Кроме того, в результате

процессов распада в масле накапливаются загрязнения, откладывающиеся в виде липких осадков. Кислоты в масле, в том числе серная, образованная взаимодействием оксидов серы с водой, возникают вследствие сгорания серосодержащего топлива. Кислоты разрушают подшипниковые сплавы, особенно свинцовистые бронзы, растворяя в них некоторые компоненты (свинец, кадмий), что ведет к ухудшению структуры сплава. Эта опасность разрушения вкладышей усиливается во много раз в период хранения автомобиля. Коррозия приводит к образованию в верхнем слое микротрещин, которые носят усталостный характер. Затем начинается выпадение частиц подшипникового сплава вкладыша (рис. 5.9).

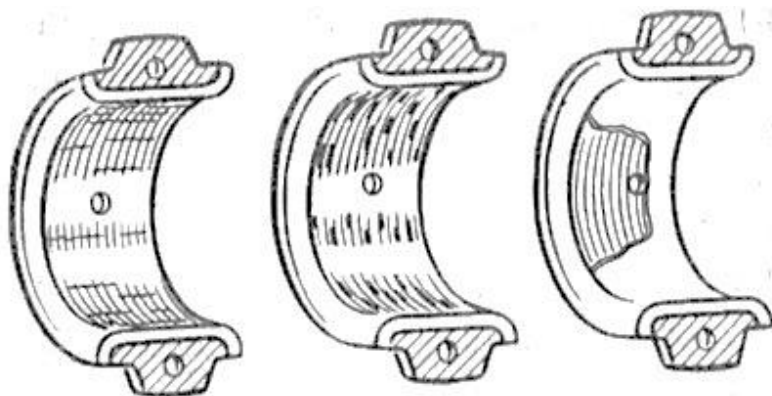


Рис. 5.9 – Разрушение антифракционного сплава вкладыша

Коррозия металлов и сплавов в безводных растворах неэлектролитов протекает с меньшей скоростью, чем в растворах электролитов (в жидкостях, проводящих электрический ток), и преимущественно по химическому меха-

низму, однако все же приводит к значительным разрушениям металлических деталей, узлов, конструкций и аппаратуры.

Коррозионная активность нефти и продуктов ее переработки определяется содержанием в ней соединений серы – сероводорода и меркаптанов (тиоспиртов с общей формулой $R-SH$). Эти соединения вызывают коррозию Co , Ni , Sn , Cu и других металлов за счет образования на поверхности сульфидов и меркаптидов металла типа $RS-M-SR$. Чем больше в жидких продуктах серы, тем сильнее коррозия. С ростом температуры коррозия металлов возрастает.

Бензин прямой перегонки при отсутствии воды практически не действует на технически важные металлы. Крекинг-бензины и сильные фенолы при взаимодействии со многими металлами осмоляются, их кислотность повышается, что вызывает коррозию этих металлов (Fe , Cu , Mg , Pb , Zn). В крекинг-бензинах устойчивы алюминий и его сплавы, а также нержавеющие стали.

Попадание в неэлектролиты воды значительно активизирует действие примесей и вызывает, особенно в присутствии солей или кислот, интенсивное протекание электрохимической коррозии.

5.4. Электрохимическая коррозия

Электрохимическая коррозия – наиболее распространенный тип коррозии металлов. По электрохимическому механизму корродируют металлы в контакте с раст-

ворами электролитов – в морской воде, растворах кислот, щелочей, солей, расплавах солей и щелочей (рис. 5.10).

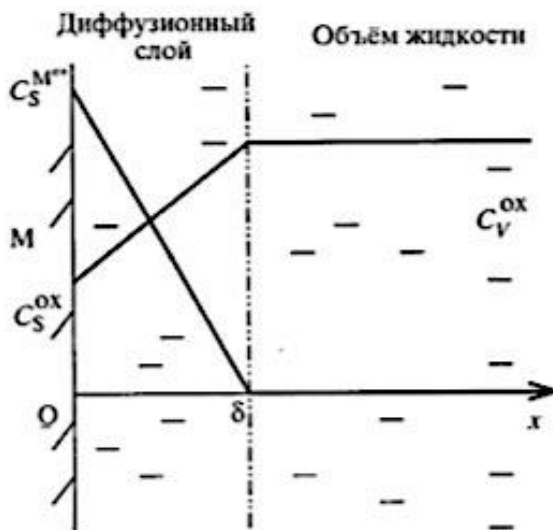
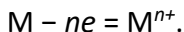


Рис. 5.10 – Распределение концентрации ионов растворяющегося металла и окислителя: C_V^{ox} , C_S^{ox} – концентрация окислителя в объеме и на поверхности соответственно; $C_S^{M^{n+}}$ – концентрация ионов металла на поверхности

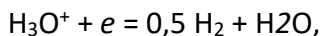
Электрохимическая коррозия – гетерогенный, многостадийный процесс, первопричиной которого является термодинамическая неустойчивость металлов в контакте с растворами электролитов. Все коррозионные процессы протекают с уменьшением свободной энергии и поэтому совершаются самопроизвольно. В простейшем случае электрохимическая коррозия металлов представляет собой совокупность двух сопряжено протекающих реакций.

Металл является донором электронов, и на его поверхности протекает анодная реакция:

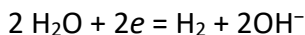


Катодная реакция, которую называют катодной деполяризующей реакцией, протекает с участием компонентов электропроводящей среды (растворов электролитов). В качестве последних чаще всего выступают водные растворы кислот, щелочей и солей. Акцепторами электронов могут быть молекулы H_2 или молекулы воды H_2O (водородная деполяризация):

в кислых растворах

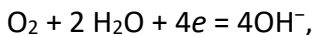


в щелочных растворах

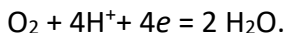


или же молекулы кислорода O_2 (кислородная деполяризация):

в нейтральных и щелочных растворах



в кислых растворах



Перенос электронов происходит на поверхности растворяющегося металла, а перемещение ионов – в электролите (жидкости).

Способность металлов выделять в электролиты положительные ионы и разрушаться при соединении в гальванические пары служит причиной электролитической коррозии, как разновидности электрохимической коррозии, в которой различают два ее вида: гальванокоррозию и микрокоррозию.

Гальванокоррозия имеет место в случае соприкосновения металлов и сплавов в присутствии электролита, образование гальванических пар при этом приводит к разъеданию одного из металлов. В гальванической паре двух металлов разъедается тот, который стоит ниже в ряду электродных потенциалов или напряжений (табл. 5.1).

Таблица 4.1

Электродные потенциалы для металлов

Металл	Реакция	Ион	Концентрация ионов		
			N	N/10	N/100
Золото	$Au^{3+} + 3e = Au$	Au^{3+}	+ 1,500	-	-
Платина	$Pt^{2+} + 2e = Pt$	Pt^{2+}	+ 1,190	-	-
Серебро	$Ag^{+} + e = Ag$	Ag^{+}	+ 0,799	+ 0,741	-
Ртуть	$Hg^{+} + 2e = Hg$	Hg^{+}	+ 0,793	+ 0,764	+ 0,735
Медь	$Cu^{+} + e = Cu$	Cu^{+}	+ 0,347	+ 0,318	+ 0,289
Водород	$H^{+} + e = H$	H^{+}	+ 0,000	- 0,058	- 0,116
Свинец	$Pb^{2+} + 2e = Pb$	Pb^{2+}	- 0,132	- 0,161	- 0,190
Олово	$Sn^{2+} + 2e = Sn$	Sn^{2+}	- 0,146	- 0,175	- 0,204
Кобальт	$Co^{2+} + 2e = Co$	Co^{2+}	- 0,230	- 0,260	- 0,290
Железо	$Fe^{2+} + 2e = Fe$	Fe^{2+}	- 0,340	- 0,370	- 0,400
Цинк	$Zn^{2+} + 2e = Zn$	Zn^{2+}	- 0,770	- 0,799	- 0,828
Алюминий	$Al^{3+} + 3e = Al$	Al^{3+}	- 1,337	- 1,356	- 1,375
Магний	$Mg^{2+} + 2e = Mg$	Mg^{2+}	- 1,800	- 1,800	- 1,900
Калий	$K^{+} + e = K$	K^{+}	- 2,925	- 2,983	- 3,041

Для пары Zn–Fe потенциал, равный алгебраической разности потенциалов составляющих ее металлов, является величиной:

$$(Zn / -0,77) - (Fe / -0,34) = -0,43 \text{ вольта,}$$

и целым остается Fe, а разъедается Zn; для пары Fe–Sn потенциал, составляет величину:

$$(Fe / -0,34) - (Sn / -0,15) = -0,19 \text{ вольта,}$$

и целым остается Sn, а разъедается Fe; для пары Fe–Cu потенциал составляет величину:

$$(Fe / -0,34) - (Cu / +0,34) = -0,68 \text{ вольта,}$$

и целым остается Cu, а разъедается Fe.

Интенсивность разъедания зависит от абсолютной величины разности потенциалов между двумя металлами, то есть, чем она больше, тем интенсивнее разъедание металла коррозией. Интенсивность разъедания возрастает с ростом температуры электролита и понижением его концентрации.

Микрокоррозия – процесс разъедания поверхности сплавов из-за неоднородности их микроструктуры и появления вследствие этого большого количества микроскопических малых гальванических пар. Часть пар при этом взаимно нейтрализуется, другая же часть взаимно не уравновешивается и имеет место микрокоррозия. Чистые металлы действию микрокоррозии не подвержены. Микрокоррозия – это гальванокоррозия, протекающая между отдельными составляющими металлических сплавов. Например, перлит П в углеродистой стали состоит из механической смеси двух компонентов: феррита Ф (твердого раствора углерода в α -железе (α -Fe)) и цементита Ц (химического соединения Fe_3C), обладающих различной электрической упругостью растворения. Феррит является электроотрицательным по отношению к цементиту, и поэтому в присутствии воды становится растворимым электродом. С увеличением количества перлита в стали явление мик-

рокоррозии усиливается; особенно резко это заметно в эвтектоидной стали (перлит).

Микрокоррозия имеет большее значение, чем гальванокоррозия, так как структурная неоднородность встречается чаще, чем стыки металлов с различающимися электродными потенциалами.

5.5. Коррозия железоуглеродистых сплавов

Сплавы на основе железа подвержены коррозии в большинстве сред. Наиболее важными факторами, обуславливающими степень их коррозионного разрушения, являются состав и состояние поверхности металла, свойства коррозионной среды и локальные условия (температура, вид нагружения и пр.).

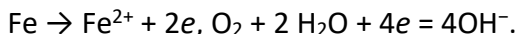
В зависимости от состава сплавы на основе железа по коррозионным свойствам подразделяются на три группы:

– стали без легирующих добавок, сварочное железо, обычные чугуны – все эти материалы легко подвергаются коррозии;

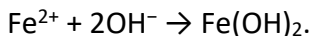
– низколегированные стали, содержащие 2–3% легирующих добавок, обычно Cu, Cr, Ni. Все эти материалы также подвергаются коррозии, но при определенных атмосферных условиях возникающая коррозионная пленка обладает хорошей адгезией и становится защитной. При этом скорость коррозии уменьшается в несколько раз по сравнению со сталями без легирующих добавок, сварочным железом, обычными чугунами. Такие низколегированные стали часто называют стареющими;

– нержавеющие стали с высоким содержанием легирующих добавок, например, 18% Cr, 8% Ni, 3% Mo. Эти стали в определенных условиях практически не корродируют.

При нормальных температурах заметная коррозия железа имеет место только в присутствии растворенного кислорода:



Далее ионы OH^- взаимодействуют с ионами Fe^{2+} и образуют гидроксид железа белого цвета:



Он окисляется до гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$, представляющего собой ржавчину (цвет от оранжевого до красно-коричневого). Окончательный продукт – бурая ржавчина $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, имеющая ряд модификаций: α -фаза (гетит) и γ -фаза (лепидокрокит). В условиях ограниченного притока кислорода могут возникать Fe_3O_4 (магнетит) $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (оксимагнетит).

При обычных температурах увеличение содержания кислорода в нейтральной водной среде сначала ускоряет коррозию стали, но после достижения определенной концентрации кислорода скорость коррозии падает. Стационарная скорость коррозии составляет 1–2,5 г/(м²·сутки).

Самый распространенный вид коррозии – атмосферная коррозия, под которой понимают процесс разрушения металлов и сплавов в атмосфере, возникающей вследствие протекания на их поверхности электрохимической или химической реакции.

Решающим фактором, влияющим на скорость и механизм атмосферной коррозии, является продолжительность пребывания на поверхности металла пленки влаги и ее толщина. Повышение температуры влечет уменьшение толщины пленки влаги и увеличивает скорость электрохимических или химических реакций; скорость коррозии при отрицательных температурах заметно ниже, чем при положительных.

В промышленных районах в воздухе содержится значительное количество газообразных примесей – газов, не входящих в элементарный состав воздуха (SO_2 , SO_3 , H_2S , NH_3 , Cl_2 , HCl и др.). Газообразные примеси, попав в пленку влаги, увеличивают ее электропроводность и тем самым изменяют скорость коррозии, повышают гигроскопичность продуктов коррозии металла. Некоторые из них действуют как депассиваторы (HCl , SO_2) или как комплексообразователи (NH_3), другие – как катодные деполяризаторы (HCl и др.).

Твердые примеси (частицы сажи, угля, песка, соли, щелочи и др.) могут быть сами коррозионно-активными (частицы NaCl , Na_2SO_4) или комплексообразователями $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Другие частицы, растворяясь в пленке влаги, увеличивают проводимость. Дымные выбросы, содержащие SO_2 , резко увеличивают скорость атмосферной коррозии.

Существенно влияют на скорость коррозии и сами продукты коррозии, образуясь на поверхности металла. В начальный период продукты коррозии способствуют кон-

денсации влаги и тем самым повышают скорость коррозии. По мере своего накопления продукты коррозии приобретают защитные свойства, замедляя доступ деполляризатора и влаги к поверхности металла, но их влияние не всегда оказывается благоприятным, как и жидких примесей, содержащихся в воздухе: преимущественно капельки растворов кислот, щелочей и солей в целом повышают коррозионную активность атмосферы.

Для снижения потерь как от атмосферной коррозии, так и противокоррозионной защиты металлов используют следующие методы:

- 1) применение защитных покрытий;
- 2) использование коррозионностойких сплавов за счет легирования;
- 3) изменение состава агрессивной среды путем снижения ее агрессивности: уменьшения относительной влажности воздуха (в помещениях), использования газообразных (летучих) и пленкообразующих ингибиторов, замедлителей коррозии.

При выборе метода защиты необходимо учитывать технико-экономические показатели основных методов защиты, условия эксплуатации деталей и узлов двигателя автомобиля или металлообрабатывающего станка, конструктивные особенности защищаемых изделий, экономичность метода, длительность защиты и т.д.

Ведущую роль в практике противокоррозионной защиты кузова автомобиля, в частности, играют пленкообра-

зующие ингибиторы Мовиль, Мовитин, ИФХАН-29А, -30А и -30Т, НГ-216, Оремин.

6. Износ конструкционных материалов

6.1. Износ и разрушение конструкционных материалов

Повышение эксплуатационной стойкости деталей и узлов из металлических сплавов было и остается одной из важнейших научно-технических задач, определяющих развитие новых и специальных отраслей машиностроения и других отраслей современной техники, которые предъявляют высокие требования к выбору материала рабочих органов машин и механизмов. В большинстве случаев такие детали или узлы работают в контакте с твердыми, жидкими или газообразными средами, рабочие поверхности которых подвергаются действию трения, а, следовательно, механическому изнашиванию. Известно, что 80–90% машин преждевременно выходят из строя не вследствие поломок, а в результате недопустимого изменения размеров, формы или состояния рабочих поверхностей в результате изнашивания.

Изнашивание (износ) в общем случае можно охарактеризовать как изменение размеров, формы, массы или состояния поверхностного слоя твердого тела под влиянием внешней среды. Износ может вызываться трением поверхностей деталей машин одна о другую, воздействием на поверхность рабочей среды потоков жидкости, газа или контакта поверхности с твердыми частицами.

Наиболее распространенным видом механического изнашивания, которому подвержены машины и агрегаты автомобильного транспорта, является абразивное изнашивание и его разновидности – газо- и гидроабразивное изнашивание. В то же время любые пары трения в закрытых механизмах – автомобилях, станках, приборах – подвержены адгезионному и усталостному изнашиванию.

Виды износа классифицируются следующим образом (рис. 6.1).



Рис. 6.1– Классификация видов износа
(по И. В. Крагельскому)

1. Микрорезание (рис. 6.1, 1). Выступы на более твердом материале фрикционной пары, а также абразивные частицы и другие включения срезают с контртела мельчайшую стружку при каждом своем соприкосновении.

2. Оттеснение материала пластическое вследствие повторного деформирования и передоформирования (рис. 6.1, II). Выступающие частицы материала гонят перед собой волну. При многократном передоформировании происходит отслаивание частиц поверхности.

3. Оттеснение материала упругое (рис. 6.1, III). Наиболее благоприятный случай – разрушения практически нет, идет крайне медленный износ.

4. Разрушение схватывающихся пленок (рис. 6.1, IV). Сопрягающиеся поверхности всегда покрыты оксидными или другого химического состава пленками. При соприкосновении пленки в местах контакта схватываются, образуя интерметаллическую зону. При движении происходит разрушение и выкрашивание частиц. На обнажившемся месте возникают новые пленки. Так многократно чередуются циклы образования разрушения и удаления пленок.

5. Разрушение основного материала (глубинное вырывание, рис. 6.1, V). Этот тип разрушения, называемый еще осповидным изнашиванием – питтингом, – имеет место тогда, когда при контакте двух пар образуется связь более прочная, чем основной материал одного или двух материалов, участвующих в процессе трения.

Виды разрушения при трении (рис. 6.2) могут быть допустимыми и недопустимыми.

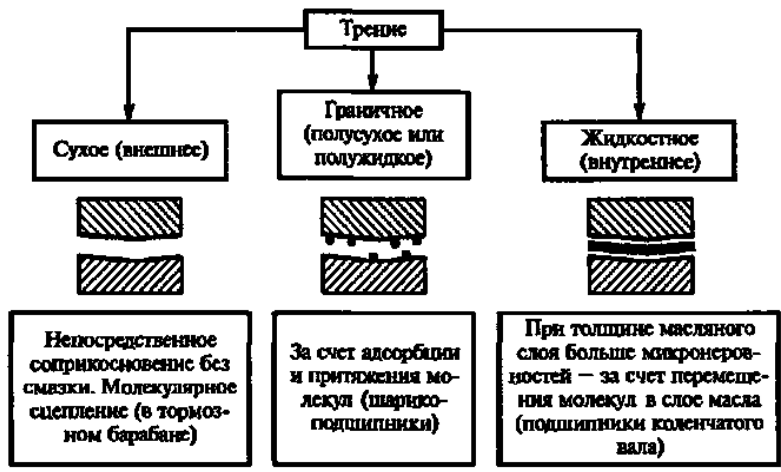


Рис. 6.2 – Классификация видов трения

К допустимому виду разрушения при трении относятся:

- механический нормальный окислительный износ;
- механический нормальный износ пленок некисло-родного происхождения;
- механическая форма абразивного износа.

В свою очередь к недопустимому виду разрушения (повреждаемости) при трении относятся:

- схватывание 1-го рода;
- схватывание 2-го рода;
- фреттинг-процесс (схватывание, динамическое окисление);
- резание, царапание, пропахивание (механическая форма абразивного износа);
- усталость при качении;
- другие виды повреждений (коррозия, кавитация, эрозия, смятие и др.).

Зависимость износа детали от наработки имеет вид, представленный на рис. 6.3 кривой износа I (мм) детали автотранспортного средства от наработки t (ч), по которой часто определяют предельный износ детали или предельный зазор в соединении вследствие износа от наработки. С увеличением наработки износ детали возрастает неравномерно. На участке 1 износ быстро нарастает до величины $I_{пр}$ за сравнительно малую наработку. На этом участке происходит приработка сопряженных поверхностей соединений. Интенсивность изнашивания в этот период зависит от шероховатости поверхности детали, условий

смазки, нагрузки и других факторов. В конце этого участка (точка А) заканчивается приработка сопряженных поверхностей.

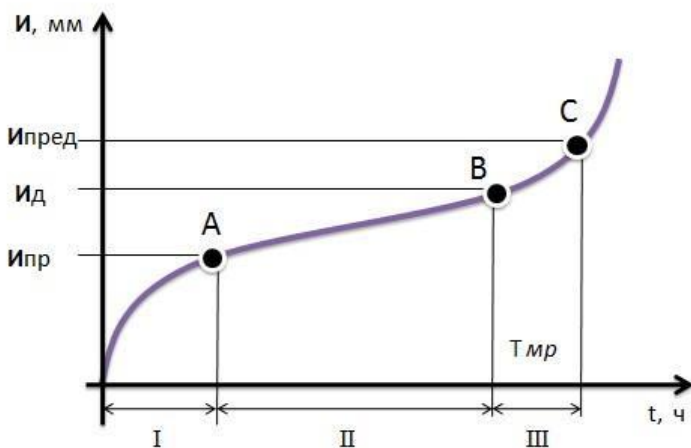


Рис. 6.3 – Классификация видов трения

На участке II, имеющем наибольшую протяженность, происходит нормальная работа детали в соединении. Износ детали увеличивается (от Ипр до Ипред) с небольшой равномерной интенсивностью. Интенсивность изнашивания зависит от условий эксплуатации, своевременности и качества проведения технического обслуживания. Длина участка II соответствует ресурсу детали или соединения. Участок III (за точкой С) характеризуется интенсивным изнашиванием детали и увеличением зазора в соединении. Соединения с изношенными деталями выше Ипред начинают работать с нарушением условий смазки, перегревом детали и стуками. Работа деталей в этих условиях часто заканчивается поломками. Износ Ипред, соответствующий

перегибу кривой в точке С, называют предельным. При достижении предельного износа или зазора деталь (соединение) необходимо снять с машины и заменить новой или восстановленной. В процессе ремонта машин износы деталей или зазоры в соединениях замеряют. По величине износов или зазоров судят о целесообразности дальнейшего использования детали или соединения.

Автомобиль считается в предельном состоянии, если в таком же состоянии находятся его основные составные части: двигатель, коробка передач, передний и задний мосты с колесными редукторами и дополнительные составные части: управление поворотом с гидросистемой, рама, кабина в сборе, раздаточная коробка.

Двигатель автомобиля находится в предельном состоянии, если находятся в предельном состоянии блок цилиндров (требуется его замена или восстановление с полной разборкой двигателя) и коленчатый вал, имеющий предельный износ шеек или механические повреждения, требующие его замены или шлифовки. При этом расход масла на угар или прорыв газов в картер равны или превышают предельные величины и не устраняются заменой комплекта поршневых колец.

Практика эксплуатации машин и другого оборудования показывает, что большая часть теряет работоспособность не вследствие поломок, а в результате износа отдельных деталей, под которыми принято понимать постоянное срабатывание поверхности деталей в результате процесса трения (рис. 6.4).

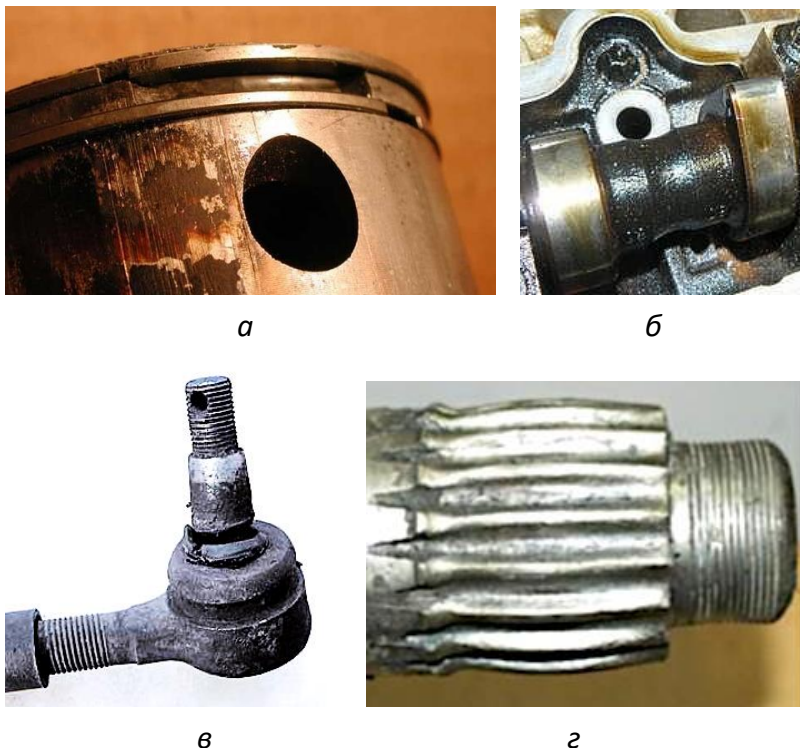


Рис. 6.4 – Износ поршня (а), задиры на рабочей поверхности кулачков распредвала (б), износ шарнира рулевых тяг и наконечника (в) и шлицевого соединения (г)

Принят ряд классификаций по видам износа при трении, построенных в основном на базе внешних условий и признаков процесса. Различают также четыре главные формы износа и несколько второстепенных (сопутствующих) процессов, которые часто классифицируются как самостоятельные виды износа. К главным видам износа можно отнести следующие виды:

- адгезионный износ, который характеризуется прилипанием частиц одной поверхности к другой поверхности за счет молекулярных сил, что приводит к резкой остановке движущихся частей, что может означать отказ;
- абразивный износ, при котором мелкие частицы или выступы на поверхности во время трения вызывают деформирующий эффект;
- коррозионный износ, сопровождающийся коррозией;
- поверхностная усталость происходит, когда нагрузка превышает усталостную прочность материала, применяется многократно, в результате чего поверхность деформируется.

Износ любой детали автомобиля происходит в 3 этапа: первый этап – приработка трущихся деталей; второй этап – период нормальной работы, который занимает 80–90 процентов всего времени работы детали; третий этап – период усиленного изнашивания (аварийного износа). В связи с этим износы делятся на 2 группы: 1-я группа износов – медленно нарастающие износы, являющиеся результатом длительной работы сил трения, воздействия высоких температур и других факторов при правильной эксплуатации автомобилей; 2-я группа – быстро нарастающие износы, обусловленные в основном неправильной эксплуатацией или плохим техническим обслуживанием (ремонтом) автомобилей: они часто приводят к аварии, их назы-

вают аварийными. В таблице 6.1 приведены отдельные примеры видов изнашивания деталей автомобилей.

Таблица 6.1

Примеры видов изнашивания деталей автомобилей

Вид изнашивания	Детали, подвергающиеся изнашиванию
Абразивное	Диски сцеплений, маховики, тормозные накладки, тормозные барабаны
Гидроабразивное	Внутренние поверхности крыльев, днище кабин и кузовов, остов рамы
Газоабразивное	Лакокрасочные покрытия кабин и кузовов, стекла кабин
Гидроэрозионное	Детали масляных, топливных и водяных насосов, гидросилителей, гидроприводов тормозов
Газоэрозионное	Поверхности камер сгорания в головках цилиндров, днища поршней, детали системы выпуска газов, детали воздушных тормозных систем
Усталостное	Листы рессор, подшипники качения, зубья шестерен
Схватывание 1-го рода	Посадочные поверхности поворотных кулаков, шарниры рулевых тяг
Схватывание 2-го рода	Гильзы, поршни, кольца. Шейки коленвала при недостатке масла
Окислительное	Шейки коленвала и распредвала, гильзы, оси коромысел, направляющие втулки клапанов и т.д.

Износ абразивный возникает в условиях трения, когда более твердые шероховатые поверхности скользят по более мягким, царапают или пропахивают ее, образуя свободные частицы. Абразивный износ может возникнуть и тогда, когда твердые частицы попадают между поверхностями фрикционной связи и изнашивают их.

Аварийный износ – это износ, под которым понимают выход из строя деталей ранее предполагаемого срока конца их эксплуатации. Он может быть вызван конструк-

тивными недоработками, низким качеством материала, изготовления и сборки, неправильной эксплуатацией машины, некачественным ремонтом.

Износ адгезионный возникает в условиях трения, когда два гладких тела скользят друг по другу, и частицы материала, вырванные с одной поверхности, прилипают к другой. Этот вид износа имеет место, когда атомы контактирующих поверхностей входят в близкий контакт. На площадях контакта при скольжении поверхностей всегда существует вероятность того, что из-за адгезионных сил разрушение этого контакта происходит не по первоначальной поверхности раздела одного материала, а внутри него.

Износ допустимый – износ, размер детали или зазора в соединении, при которых деталь или соединение могут быть поставлены на машину без восстановления и будут удовлетворительно работать в течение предусмотренного межремонтного ресурса. Детали или соединения с износами или зазорами меньше или равными допустимым устанавливаются на машину при ремонте без каких-либо восстановительных процессов, а с износами или зазорами, превышающими допустимые, выбраковывают или восстанавливают. Критерии предельного состояния машин и их составных частей, предельные и допустимые износы, зазоры и размеры деталей указывают в нормативно-технической документации.

Износ естественный – 1-я группа износов – медленно нарастающие износы, являющиеся результатом длитель-

ной работы сил трения, воздействия высоких температур и других факторов при правильной эксплуатации автомобилей. Эти износы определены самой конструкцией автомобилей и называются естественными.

Износ коррозионный имеет место, когда контакт поверхностей происходит в коррозионных средах. В процессе скольжения образующиеся на поверхности пленки разрушаются и коррозионное воздействие распространяется вглубь материалов.

Износ моральный – это износ, который наступает тогда, когда появляются более совершенные конструкции аналогичного оборудования, т.е. машины с большей производительностью, экономичностью, большей степенью автоматизации и удобством в эксплуатации, меньшей материалоемкостью и т.д.

Износ предельный – износ, при котором нарушаются нормальные условия работы сопряженных деталей и дальнейшая эксплуатация становится невозможной или неэкономичной. После пробега автомобиля, соответствующего предельному износу (точка В на рис. 6.3), деталь необходимо ремонтировать, так как ударные нагрузки, возникающие между сопряженными деталями вследствие большого зазора, приводят к резкому увеличению износа и могут вызывать поломку деталей.

Износ трением качения – в процессе трения износа при качении (рис. 6.5, а) развиваются нормальные напряжения. При длительном нагружении под действием пере-

менных давлений это приводит к выкрашиванию частиц на поверхности, то есть образованию раковин (питтинга).

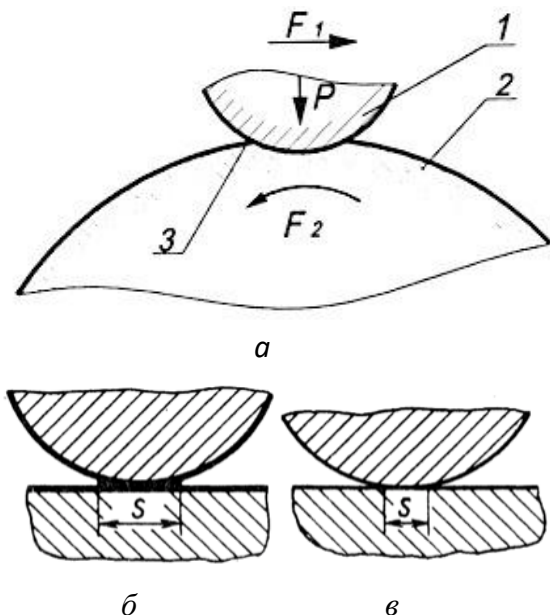


Рис. 6.5 – Схемы износа трением качения (а) и контакта при трении качении ролика с кольцом при наличии смазки (б) и без неё (в):

F_1 – направление движения ролика 1; F_2 – направление движения вала 2; 3 – упругая деформация при переменной нагрузке; P – усилие давления

Если наряду с нормальными напряжениями развиваются также и касательные, то происходит проскальзывание, в наибольшей степени способствующее процессу износа. Нагружение, сочетающее скольжение и качение, возможно, например, в зубчатых передачах. Износ при скольжении, вызываемый вращением, образуется в вер-

шинах опор и в шаровых подпятниках. Это тот вид износа, при котором имеет место эффект вращения при относительном смещении соприкасающихся участков поверхности. Все три типа износа могут проявиться в смешанных формах. При обычном трении как без смазочного материала, так и при наличии граничной смазочной пленки детали контактируют на очень малой площади, составляющей 0,01-0,0001 номинальной площади сопряженных поверхностей. В результате участки фактического контакта испытывают высокие напряжения, что приводит к их взаимному внедрению, пластической деформации и интенсификации изнашивания. Схемы контакта при трении качения приведены на рис. 6.5, б-в.

Износ трением скольжения – в процессе износа при скольжении материалы под действием напряжений работают на срез (рис. 6.6, а). Схемы контакта стальной и бронзовой трущихся деталей имеют вид при граничной смазке (рис. 6.6, б) и при избирательном переносе (ИП) (рис. 6.6, в). Если при граничной смазке контакт сопряженных поверхностей происходит только в отдельных точках, то при ИП он осуществляется через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой меди. В результате площадь фактического контакта возрастает в десятки раз, а материал деталей испытывает лишь упругие деформации. При граничной смазке взаимодействие неровностей поверхностей вызывает усталостное изнашивание. При ИП трение непрерывное, площадки действительного контакта плоские. При трении с граничной смазкой и трении без смазочного

материала поверхности деталей всегда покрыты окисными пленками (рис. 6.7), которые предотвращают непосредственный контакт металлических поверхностей и их схватывание. Однако окисные пленки хрупки, не способны многократно деформироваться и поэтому в процессе трения разрушаются в первую очередь. С повышением температуры в зоне трения окисные пленки утолщаются, при этом увеличивается и объем их разрушения.

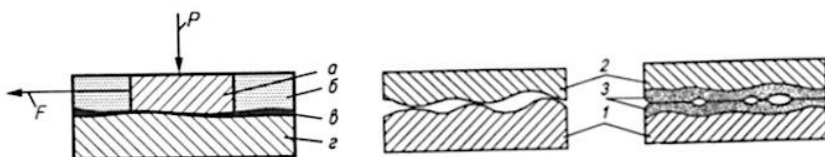


Рис. 6.6 – Схемы износа трением скольжения (а), контакта детали при граничной смазке (б) и избирательном переносе (в): F – направление движения; P – усилие давления; а – первое контактирующее тело; б – окружающая среда; в – промежуточное вещество; з – второе контактирующее тело; 1 – сталь; 2 – бронза; 3 – пленка меди

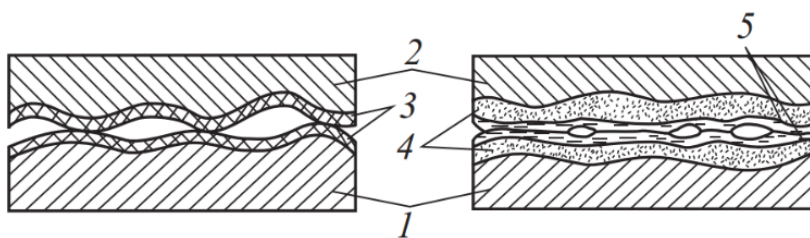


Рис. 6.7 – Схемы контакта детали при граничной смазке (а) и избирательном переносе (б): 1 – сталь; 2 – бронза; 3 – окисная пленка; 4 – сервовитные пленки; 5 – полимерные пленки

При ИП сервовитная пленка 4 (рис. 6.6) является мощным катализатором полимеризации. Полимерная

пленка 5 образуется из свободных радикалов органических веществ, которые возникают в процессе трибодеструкции смазочного материала; она предотвращает непосредственный контакт металлических поверхностей и снижает контактные давления.

Износостойкость (износоустойчивость) – сопротивление материалов деталей машин и других трущихся частей износу. Износостойкость оценивается, например, уменьшением массы литой детали за время работы, ее линейных размеров или изменением объема детали. В результате износа изменяются размеры деталей, увеличиваются зазоры, возникают дополнительные динамические нагрузки. Большой износ может привести даже к поломке детали. Износ деталей снижается с повышением твердости и понижением шероховатости трущихся поверхностей. Для повышения износостойкости деталей применяют смазку, термическую и химико-термическую обработку рабочих поверхностей, для изготовления деталей применяют антифрикционные материалы и т.п.

6.2. Методы испытания износостойкости конструкционных материалов

Испытания износостойкости конструкционных материалов используются в машиностроении при выборе и оценке их работоспособности как состояния изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации (стандартами, техническими условиями,

нормативами и т.п.). Технический результат испытания износостойкости конструкционных материалов – это получение эмпирической степенной зависимости интенсивности изнашивания как функции нормального давления, которую можно использовать при расчете и прогнозировании работоспособности узлов трения.

Образцы 1 конической, пирамидальной или призматической формы заданной геометрии (рис. 6.8) трутся вершиной о плоскую поверхность 2 с закрепленными на ней абразивными частицами (абразивную шкурку).

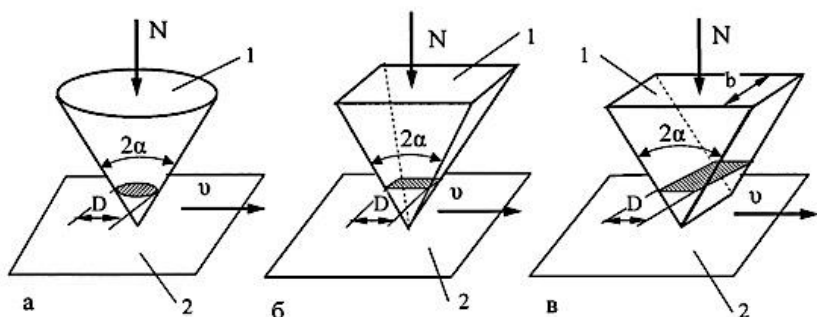


Рис. 6.8 – Схемы испытания износостойкости материала

В результате изнашивания происходит укорочение образца на величину линейного износа и образуется площадка износа, параллельная плоскости трения. При этом номинальное нормальное давление уменьшается по мере роста ширины площадки износа. Зная геометрические характеристики образца по ширине износа, вычисляют суммарную величину линейного износа, площадь площадки износа и номинальное нормальное давление. Износостойкость определяется на основании временной зависимости

линейного износа и номинального нормального давления, на основании которых вычисляют эмпирическую зависимость интенсивности изнашивания как функции номинального нормального давления в виде:

$$I = K \cdot q^p,$$

где I – интенсивность линейного изнашивания; q – номинальное нормальное давление; K , p – постоянные, зависящие от материала пары трения и условий контактного взаимодействия.

Существует гипотеза, что чем выше прочность металла, тем выше износостойкость. Однако экспериментально подтвержденные зависимости между износостойкостью и механическими свойствами металлических материалов (сталей) отсутствуют. Некоторые попытки исследователей установить зависимость износостойкости от других физических характеристик металла, в частности от энтальпии, температуры плавления, энергии активации самодиффузии не получили распространения.

Критерий износостойкости должен, по-видимому, быть достаточно универсальным, позволяющим одновременно учитывать возможные варианты и сочетания действия различных факторов. Универсальным критерием может служить количество энергии, выделяемое и потребляемое при трении. Энергетическая теория трения и изнашивания позволяет объединить существующие частные теории и объяснить многие противоречивые данные, опубликованные в литературе.

Из всех видов оценки изнашивания механический вид наиболее доступен прогнозированию, и потому наиболее полно сформулированы задачи о механическом износе на языке математики. Математические модели механического изнашивания с той или иной точностью соответствуют реальным процессам [8]. Однако основным недостатком механической теории изнашивания является то, что она рассматривает силу и деформации, как причина изнашивания. Избавиться от этого представления конечно трудно, однако, если рассмотреть изнашивания, как результат некоторого процесса преобразования энергии (в данном случае механической энергии сил трения в тепловую) и часть энергии переходит в этом процессе в материал поверхностных трущихся слоев (в зависимости эффективности превращения или так называемое КПД процесса всегда меньше единицы и превращение абсолютно не полное), то часть энергии, обозначаемая как ΔE , есть причина изнашивания и критерий износостойкости металлов (рис. 6.9).

Для каждого вида изнашивания соответствует определенная работа разрушения. Поэтому не важно, каким путем подводится энергия, а важно, сколько она подводится к материалу. Таким образом, с точки зрения энергетической теории изнашивания все виды изнашивания одинаково значимы и имеют единую природу, протекающую по различным механизмам. В свете данных обстоятельств и учета того, что механический вид изнашивания наиболее доступен, наряду со специальными

испытаниями достаточно широко распространены стандартные испытания износостойкости конструкционных материалов на машинах трения.



Рис. 6.9 – Схема энергетического баланса процесса изнашивания по В.С. Попову [9]

Рассмотрим для примера установку УМТ-1 (рис. 6.10). Испытания износостойкости конструкционных материалов

на ней можно выполнять в широком интервале скоростей скольжения и нагрузок.

Испытательная установка УМТ-1 состоит из электродвигателя 7, привода 2, на валу которого закреплен один из трущейся пары образец 3. К поверхности данного образца 3 поджимается второй образец пары трения 4, закрепленный в держателе 5. Держатель расположен в узле нагружения 6, перемещаемом с помощью привода 7.

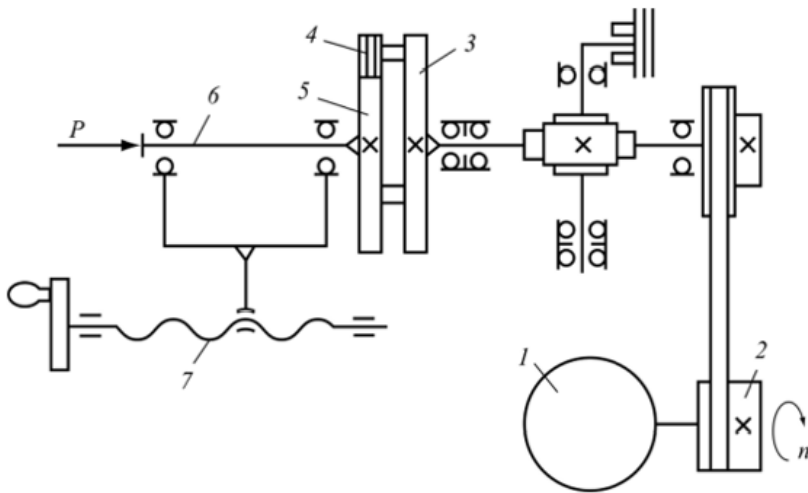


Рис. 6.10 – Схема установки УМТ-1:

- 1 — электродвигатель; 2 — привод; 3 — образец; 4 — пара трения; 5 — держатель; 6 — узел нагружения; 7 — привод

Испытания конструкционных материалов на установке УМТ-1 позволяют определить линейный износ, скорость изнашивания, интенсивность изнашивания и вычислить износостойкость.

Метод испытания конструкционных материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы заключается в том, что при одинаковых условиях производят трение образцов исследуемого и эталонного материалов об абразивные частицы, подаваемые в зону трения испытательной установки (рис. 6.11) и прижимаемые к образцу вращающимся резиновым роликом, измеряют износ образцов испытуемого и эталонного материалов, а износостойкость испытуемого материала оценивают путем сравнения его износа с износом эталонного образца.

Испытания проводят на вышеупомянутой испытательной установке, содержащей привод 7, обеспечивающий вращение вокруг горизонтальной оси резинового ролика 6, образцедержатель 2, рычаг 3, прижимающий образец 1 к ролику 6, устройство 5, дозирующее подачу абразивных частиц в зону трения по направляющему лотку 4, устройство 8 для контроля суммарного количества оборотов ролика в процессе испытаний.

Диаметр ролика 6 должен быть в диапазоне 48—50 мм, ширина – $15 \pm 0,1$ мм. Твердость материала ролика – 78–85 ед. по ГОСТ 263–75.

Абразивный материал – электрокорунд зернистостью 16-П по ГОСТ 3647–80 с относительным содержанием влаги не более 0,15% используют при общей сравнительной оценке износостойкости конструкционного материала.

При оценке износостойкости конструкционного материала в конкретных условиях изнашивания допускается

использовать абразивный материал, соответствующий материалу, воздействию при эксплуатации, но с размером зерен не более 1,0 мм.

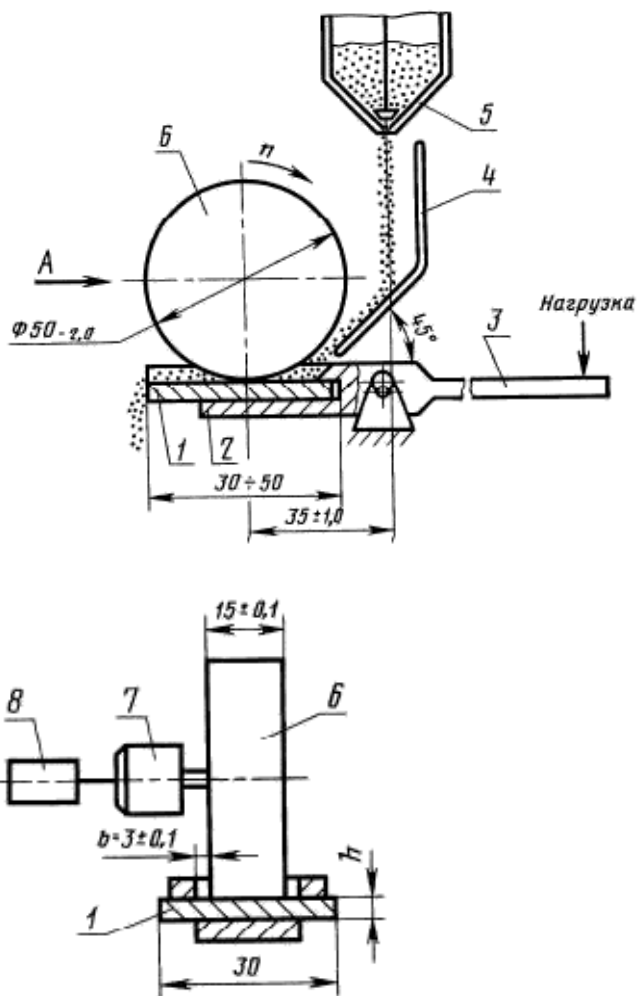


Рис. 6.11 – Схема испытательной установки с подачей абразивных частиц в зону трения

Повторное использование абразивного материала не допускается.

Образцы исследуемых и эталонных материалов изготавливают в виде пластин шириной 30 мм, длиной 30–50 мм и толщиной h не менее 1 мм с допусками на размеры по седьмому классу точности по ГОСТ 24642–81, ГОСТ 24643–81 и шероховатостью рабочей поверхности не ниже 7-го класса по ГОСТ 2789–73. Допускается повторное использование испытанных образцов в участках, не подвергшихся изнашиванию, а также после удаления механической или иной обработкой следов изнашивания, образованных в результате предыдущих испытаний.

Эталонные образцы изготавливают из стали 45 по ГОСТ 1050–88 в отожженном состоянии с 190–200 HV.

Износ испытываемых и эталонных образцов определяют путем взвешивания до и после испытаний с погрешностью не более 0,1 мг. Потеря массы образца вследствие изнашивания при испытаниях должна составлять не менее 5 мг.

Перед испытаниями:

- определяют твердость образцов и маркируют их клеймением на нерабочих поверхностях;
- проводят приработку ролика трением его о поверхность шлифовальной шкурки типа 2 по ГОСТ 6456–82 зернистостью 8–11 по ГОСТ 3647–80, закрепленной в образцедержателе на плоской стальной пластине. Приработку проводят при нагрузке на ролик (22 ± 1) Н до полного прилегания к поверх-

ности по всей длине образующей ролика. После приработки ролик промывают в промывочной жидкостью (ацетон, бензин);

- проверяют влажность абразивного материала по ГОСТ 5382–91 и при необходимости доводят ее до соответствия требованиям;
- образцы последовательно промывают ацетоном или бензином, просушивают на воздухе и взвешивают.

Для проведения испытания:

- образец устанавливают в образцедержателе испытательной установки;
- прижимают образец рычагом 3 к ролику с усилием $(44,1 \pm 0,25)$ Н;
- ролик приводят во вращение, с частотой $N = (60 \pm 2)$ (об/мин). Включают дозирующее устройство, обеспечивающее непрерывную подачу абразивного материала в зону трения. Непрерывность подачи абразивного материала в процессе испытаний контролируют по наличию абразивного материала по всей ширине ролика.

Испытания образца из исследуемого материала продолжают в течение времени, соответствующего количеству оборотов ролика, указанному в таблице. Испытания образца из эталонного материала проводят при 600 оборотах ролика. Отсчет оборотов проводят от момента начала подачи абразивного материала.

Испытания повторяют для 3 испытуемых и 3 эталонных образцов. Результаты взвешивания образцов до и после испытаний заносят в протокол. Среднеарифметическое значение потери массы эталонных образцов по результатам испытаний должно находиться в пределах $(67 \div 6,1)$ мг. Если среднеарифметическое значение потери массы выходит за эти пределы, то проверяют правильность выполнения условий испытаний, и после приведения их в соответствие с указанными требованиями повторяют испытания.

По окончании испытаний останавливают привод, снимают нагрузку, освобождают образец, промывают последовательно в промывочных жидкостях и взвешивают. При износе образца менее 5 мг устанавливают новый образец, и испытания проводят в течение времени, соответствующего удвоенному количеству оборотов ролика. При установке и съеме образцов не допускается повреждение их поверхностей.

После каждых 12 испытаний проверяют наружный диаметр ролика, и при диаметре менее 48 мм его заменяют. Для нового ролика производят приработку трением его о поверхность шлифовальной шкурки типа 2 по ГОСТ 6456–82 зернистостью 8–11 по ГОСТ 3647–80, закрепленной в образцедержателе на плоской стальной пластине. Приработку проводят при нагрузке на ролик (22 ± 1) Н до полного прилегания к поверхности по всей длине образующей ролика.

По результатам взвешивания образцов до и после испытаний определяют среднеарифметическое значение потери массы g эталонных образцов и среднеарифметическое значение потери массы образцов исследуемого материала по формулам:

$$q_{\text{ЭТ}} = (g_{1\text{ЭТ}} + g_{2\text{ЭТ}} + g_{3\text{ЭТ}})/3;$$
$$q_{\text{ИС}} = (g_{1\text{ИС}} + g_{2\text{ИС}} + g_{3\text{ИС}})/m,$$

где $q_{\text{ЭТ}}$ – значение потерь массы при испытании эталонных образцов;

$q_{\text{ИС}}$ – значение потерь массы при испытании образцов исследуемого материала;

$g_{i\text{ЭТ}}$ – среднеарифметическое значение потери массы эталонных образцов; i – номер образца ($i = 1 \div 3$);

$g_{i\text{ИС}}$ – среднеарифметическое значение потери массы эталонных образцов;

m – количество образцов исследуемого материала.

Относительную износостойкость K_N исследуемого материала вычисляют по формуле:

$$K_N = (q_{\text{ЭТ}} \rho_{\text{ЭТ}} N_{\text{ЭТ}}) / (q_{\text{ИС}} \rho_{\text{ИС}} N_{\text{ИС}}),$$

где $\rho_{\text{ЭТ}}$, $\rho_{\text{ИС}}$ – плотности эталонных и исследуемых образцов соответственно;

$N_{\text{ЭТ}}$, $N_{\text{ИС}}$ – количество оборотов ролика при испытаниях образцов из эталонного и исследуемого материалов.

7. Диагностика (дефектация) деталей и механизмов двигателя

7.1. Методы контроля при диагностике деталей и механизмов двигателя

Диагностика (дефектация) деталей и механизмов двигателя – в ремонтном производстве технологический процесс оценки технического состояния деталей с последующей их сортировкой на группы годности. В ходе этого процесса осуществляется проверка соответствия деталей техническим требованиям, которые изложены в технических условиях на ремонт или в руководствах по ремонту, при этом используется сплошной контроль, т.е. контроль каждой детали. Кроме того, дефектация деталей автомобиля – это также инструментальный и многостадийный контроль.


В процессе дефектации деталей применяются следующие методы контроля:

- органолептический осмотр (внешнее состояние детали, наличие деформаций, трещин, задиров, сколов и т.д.);
- инструментальный осмотр при помощи приспособлений и приборов (выявление скрытых дефектов деталей при помощи средств неразрушающего контроля), безшкальных мер (калибры и уровни) и микрометрических инструментов (линейки, штангенинструменты, микрометры и т.д.) для оценки

размеров, формы и расположения поверхностей деталей.

Контролю в процессе дефектации подвергаются только те элементы детали, которые в процессе эксплуатации повреждаются или изнашиваются.

Диагностика безразборная предусматривает в основном несколько различных способов:

- диагностика с помощью приборов; 
- диагностика методом анализа акустических шумов;
- диагностика по состоянию выхлопа;
- диагностика по состоянию свечей зажигания.

Наиболее точная картина неисправностей двигателя получается при одновременном применении всех способов диагностики с последующим «перекрестным» анализом полученных результатов.

7.2. Диагностика двигателя безразборная

Диагностика безразборная методом анализа акустических шумов – непосредственно на работающем двигателе определяется на слух состояние большинства сопряжений. Исправный двигатель издает равномерный шум, о такой работе образно говорят, что двигатель «шепчет». Но рано или поздно появляются разные аномалии. Наиболее часто появляется периодическое «вздрагивание» двигателя на холостых оборотах, которое обычно происходит из-за пропусков воспламенения топливо-воздушной смеси (дефектные свечи, малый зазор в свечах, «раннее» зажигание, «богатая» или «бедная» смесь). «Вздрагивание» в этом

случае сопровождается синхронными «хлопками» в выхлопной трубе. Равномерная «тряска» двигателя на оборотах холостого хода характерна для одного или более неработающих цилиндров. Причины могут быть разные – не работает свеча или форсунка, нет компрессии в одном или нескольких цилиндрах, обрыв высоковольтного провода, «прогар» прокладки головки блока между двумя смежными цилиндрами и др. Последний дефект выявляется при измерении компрессии: в этих цилиндрах величина компрессии будет одинаковой между собой и низкой, по отношению к другим цилиндрам. Еще одно характерное проявление связанное с вибрацией двигателя. На оборотах холостого хода двигатель работает ровно, а при резком нажатии на педаль дроссельной заслонки двигатель набирает обороты с вибрацией («тряской») и затем вновь на высоких оборотах работает ровно. В езде такой дефект выглядит как «провал». Анализируя полученные результаты, нужно учесть разную скорость вращения основных двух валов двигателя. Скорость вращения распределительного вала всегда меньше скорости вращения коленчатого вала ровно в два раза. Неисправности газораспределительного механизма (ГРМ) и цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) можно сразу разделить исходя из того, что при одинаковой скорости вращения коленчатого вала частота стуков будет различной. Для прослушивания шумов в двигателе понадобится приспособление, которое представляет собой медицинский стетоскоп с механическим датчиком. Механический датчик в приспособлении для прослушивания

двигателя должен быть модернизированным, для чего следует прикрепить к мембране небольшой металлический зонд с плоской пятой, которая защитит ее (мембрану) от непредвиденных повреждений, возникающих от сильного давления. Двигатель нужно прослушивать в холодном и полностью прогретом состоянии, а также на разных оборотах. Изменение оборотов с разной динамикой даст возможность более правильно проанализировать характер шумов. Если на холостых оборотах двигателя слышится ясный тикающий звук, то это указывает на то, что в клапанном механизме увеличен тепловой зазор. Если же тепловой зазор тщательно отрегулирован, то возможен неравномерный износ соприкасающихся поверхностей. Если при запуске холодного двигателя гидрокомпенсаторами клапанов в зоне распределительного вала и привода клапанов слышится резкий стрекочущий звук, который исчезает по мере прогрева двигателя, то это считается нормой. Если после полного прогрева двигателя этот звук не исчез, то, возможно, есть неисправности плунжерной пары, одного из гидравлических толкателей. Ясный тикающий звук говорит о сильном износе направляющих втулок клапанов. Дополнительно этот диагноз могут подтвердить сальники, которые быстро изнашиваются после их очередной замены. Резкий звук, который начинает несколько ослабевать по мере прогрева двигателя, зачастую вызван увеличенным зазором между толкателем клапана и его гнездом в головке блока цилиндров. Этот звук, в принципе, не вызывает опасений. Глухой звук с частотой, в два раза меньшей,

чем частота коленчатого вала, издают изношенные подшипники распределительного вала. Звук прослушивается более четко на холостых оборотах полностью прогретого двигателя. Дефект не вызывает особого опасения, но указывает на то, что в ближайшее время стоит проверить газораспределительные механизмы. Несильные звонкие звуки, которые прослушиваются, указывают на увеличенный зазор между стенками цилиндра и юбкой поршня. Особой опасности при этом нет, но ремонт будет необходим в ближайшее время. Самым опасным считается звонкий и неприятный стук, который исходит из зоны ЦПГ. В этом случае наиболее вероятно, что имеется нарушение в сопряжении подшипник шатуна – шатунная шейка. При резком наборе оборотов двигателя звук усиливается, а при отключении цилиндра от системы зажигания практически исчезает. В дизельных двигателях в этом случае производят блокировку подачи топлива, для чего немного ослабляют гайку форсунки. Аналогичные по частоте стуки на дизельных двигателях указывают на те же неисправности. Обычно неисправности такого рода возникают из-за несоблюдения правил эксплуатации двигателя и всегда сопровождаются резким снижением давления масла в системе смазки. При таком серьезном дефекте последующая работа двигателя приведет к полному разрушению коленчатого вала и сопутствующих ему деталей; также не исключен обрыв поршня, который разрушит блок цилиндров. На форсунку при ослаблении гайки нужно будет накинуть ветошь, для того чтобы не разбрызгалось топливо. Прослушивае-

мый глухой стук указывает на увеличенные зазоры в коренных подшипниках коленчатого вала. При резком сбросе оборотов звук становится более заметным, а в сочетании с пониженным рабочим давлением масла велика вероятность серьезного ремонта двигателя. Если прослушиваются хлопающие звуки, то это указывает на то, что ослаблена цепь или произошла поломка цепного механизма. Хлопки проявляются сильнее на холостых оборотах и при резком их сбрасывании: вовремя не устраненная неисправность такого рода может привести к встрече клапанов с поршнями. Если в непосредственной близости от бензинового насоса появился характерный клапанный звук, то это говорит об увеличенном зазоре в его приводе.

Диагностика безразборная по состоянию выхлопа – у исправного двигателя при рабочей температуре в теплую погоду выхлоп практически бесцветный. После запуска двигателя, по мере прогрева глушителя, можно наблюдать более белый выхлоп (пар), который прекращается после испарения оттуда влаги. В холодную погоду пар виден и на прогревом двигателе. Густой белый выхлоп бывает в двух случаях – попадание по разным причинам охлаждающей жидкости в цилиндр либо попадание масла непосредственно в выпускную систему, где оно в большей части испаряется, а не сгорает. Такой выхлоп «висит» в воздухе и имеет характерный запах масла. Когда выхлоп черный диагноз один – слишком «богатая» топливо – воздушная смесь по целому ряду причин. Такой выхлоп всегда сопровождается повышенным расходом топлива с негативными

последствиями для двигателя. «Сизый» выхлоп (иногда с оттенком голубого цвета) – это свидетельство попадания и сгорания масла в камере сгорания. Пути попадания два – через кольца и через сальники клапанов и направляющие втулки клапанов по рассмотренным выше причинам. Диагностика технического состояния двигателя, и тем более вынесение «приговора» о необходимости ремонта, не может быть полной без использования газоанализатора. Но для анализа его технического состояния недостаточно простого газоанализатора для измерения CO, здесь уже нужен более «крутой», четырехкомпонентный (CO, CH, O₂, CO₂). В данном анализе много обширных и взаимосвязанных вопросов: программная настройка системы управления двигателем, техническое состояние двигателя и датчиков системы управления двигателем, эффективность смесеобразования и сгорания топлива и др., поэтому оставим этот вопрос для отдельного разговора.

Диагностика по параметрам картерного масла даёт возможность определить темп изнашивания деталей двигателя, качество работы воздушных и масляных фильтров, герметичность системы охлаждения, а также годность самого масла. Для этого необходимо периодически отбирать из картера пробы масла, измерять концентрацию в нём продуктов износа и кремния, определять вязкость и содержание воды. Превышение допустимых норм по концентрации в масле металлов укажет на неисправную работу сопряжённых деталей, превышение нормы содержания кремния на неисправность фильтров, присутствие воды на

неисправность системы охлаждения, а пониженная вязкость позволит судить о годности масла. Возможность диагностики двигателя по концентрации продуктов износа (свинца, хрома, железа, алюминия и др.) в картерном масле обусловлена зависимостью её уровня только от интенсивности изнашивания соответствующих деталей (подшипников, колец, цилиндров) двигателя. Это означает, что по истечении некоторого времени работы масла в двигателе (при практическом постоянстве объёма масла, интенсивности очистки и угаре) концентрация каждого из продуктов износа в масле достигает определённого уровня и стабилизируется. Убыль и пополнение взвешенных в масле частиц уравнивается. Этот уровень будет тем выше, чем больше скорость изнашивания деталей двигателя. Так как скорость изнашивания при исправных системах фильтрации и охлаждения характеризует исправность сопряжения трущихся пар механизма, то по уровню концентрации можно выявить скрытые и назревающие отказы.

Диагностика безразборная по состоянию свечей зажигания – по внешнему виду свечи можно многое сказать как о работе двигателя в целом, так и об отдельных его узлах (рис. 7.1). Осмотр свечи лучше проводить после продолжительной работы двигателя, например, после длительной поездки по загородному шоссе. При нормальном состоянии свечей на технически исправном двигателе, при работе на качественном топливе изолятор центрального электрода чистый, нагар и отложения минимальны (рис. 7.1, а). Свинцовые отложения – налет (рис. 7.1, б) образу-

ется от содержащихся в бензине свинцовых соединений, может убить не только свечи, но и катализатор с лямбда-зондами.



Рис. 7.1 – Внешний вид состояния свечей зажигания:
а – нормальный вид; б – свинцовые отложения; в – бархатисто-черный нагар; г – масляный нагар; д – зольные отложения; е – оплавление и частичное разрушение электродов свечи

Типичный пример свечи от двигателя с повышенным расходом топлива (рис. 7.1, в): бархатисто-черный нагар свидетельствует о переобогащенности топливно-воздушной смеси из-за неисправности системы впрыска топлива (основная причина). Масляный нагар (рис. 7.1, г) – налицо повышенный расход масла двигателем, выхлоп такого автомобиля имеет сизоватый оттенок. Причина этого обычно в плохом состоянии маслоотражательных колпачков, кото-

рые уже не справляются со своей работой по очистке стержня клапана от излишков масла. Другой путь попадания масла в цилиндр через изношенные поршневые кольца. Причина этого нароста – сгорание масла вследствие выработки или залегания маслосъемных поршневых колец. Электрод свечи оброс зольными отложениями (рис. 7.1, д): у двигателя повышенный расход масла, при перегазовках из выхлопной трубы сильное, синее дымление, запах выхлопа похож на мотоциклетный. К оплавлению и частичному разрушению электродов свечи приводит калильное зажигание (рис. 7.1, е).

Диагностика безразборная с помощью приборов – предусматривает применение измерительных приборов, основными из которых являются измеритель давления в масляной магистрали (манометр) и измеритель компрессии (компрессометр). Оценить общее состояние коренных и шатунных шеек коленчатого вала, масляного насоса и всех сопряжений, в которые при работе двигателя подается масло под давлением, можно с помощью масляного манометра. Замеры проводят прямым подключением резьбового наконечника манометра в масляную магистраль, на место штатного датчика давления масла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автомобильная промышленность — одна из ведущих отраслей машиностроения.

Эксплуатационные свойства, обеспечивающие движение автомобиля, существенно зависят от конструкции и технического состояния автомобиля, его систем и механизмов. Чем совершеннее конструкция автомобиля и лучше его техническое состояние, тем выше эксплуатационные свойства автомобиля. Поэтому автомобиль, его системы и механизмы конструируют таким образом, чтобы он имел определенные эксплуатационные свойства, требуемые для заданных условий эксплуатации и обеспечивающие его эффективное использование.

На современном этапе, когда организована разработка и изготовление новых образцов техники, весьма важно уметь не только оценивать ее основные эксплуатационные характеристики, но и гарантированно обеспечивать эксплуатационные свойства конструкционных материалов, используемых для изготовления деталей узлов и механизмов автомобиля. При выборе материала для конкретной детали автомобиля необходимо исходить из условия, что изготовленная из него деталь будет обладать достаточным запасом прочности и надежности и быть устойчивой к преждевременному износу. Так, пружины и рессоры должны быть упругими, оси — стойкими против истирания, валы должны быть устойчивы к изгибу, подшипники скольжения — обладать антифрикционными свойствами. В

процессе работы многие детали автомобиля нагреваются до высоких температур, достигающих 1000 °С и более. Для таких деталей важной характеристикой является жаропрочность — способность материалов сохранять необходимую прочность для сохранения своих параметров при высоких температурах. Для деталей, работающих при высоких температурах в течение очень длительного времени устанавливают предел ползучести.

При изготовлении конструктивных элементов механизмов автомобиля используют черные металлы (стали и чугуны). Техническое состояние деталей и эксплуатационных характеристик их материалов изменяется под действием внешней среды, циклических нагрузок – коррозия, старение, усталостное разрушение и др. Технологические требования к материалу автомобиля определяют возможность изготовления деталей с минимальными трудозатратами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Испытание на ударный изгиб («Impact Test»). – URL: <https://metall-expertiza.ru/articles/301429> (дата обращения 15.11.2022).

2. Определение ударной вязкости и порога хладноломкости. – URL: <https://poisk-ru.ru/s29451t10.html> (дата обращения 15.11.2022).

3. Ульянова, В.Г. Системы и механизмы двигателя внутреннего сгорания / В.Г. Ульянова. – Челябинск: Изд-во «Уральская академия», 2015. – 62 с.

4. Смирнов, Е.Н. Технология конструкционных материалов: производство горячекатаных блюмов и сортовых заготовок: учеб. пособие / Е.Н. Смирнов, В.А. Белевитин, В.А. Скляр и др. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2016. – 188 с. – ISBN 978-59067-7-7.

5. Белевитин, В.А. Материаловедение: свойства металлов и сплавов: учеб. пособие / В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2012. – 236 с. – ISBN 978-5-85716-917-9.

6. Белевитин, В.А. Упрочнение и восстановление деталей машин: справоч. пособие / В.А. Белевитин, А.В. Суворов. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2015. – 251 с.: ил. – ISBN 978-5-906777-38-6.

7. Бражников, А.И. Бесконтактный одноканальный времяимпульсный расходомер жидкости / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Е.В. Бражникова и др. // Метрология. – 2004. – № 11. – С. 16–25.

8. Костецкий, Б.И. Энергетический анализ процессов изнашивания деталей машин / Б.И. Костецкий, В.А. Ляшко, А.К. Караулов и др. // Машиноведение. – 1974. – № 4. – С. 108–113.

9. Попов, В.С. Долговечность оборудования огнеупорного производства / В.С. Попов, Н.Н. Бычков, Н.С. Дмитриченко и др. – Москва: Металлургия, 1978. – 232 с.

10. Махкамов, К.Х. Расчет износостойкости машин: учеб. пособие / К.Х. Махкамов. – Ташкент: ТашГТУ, 2002. – 144 с.

Учебное издание

Белевитин Владимир Анатольевич

Эксплуатационные свойства конструкционных материалов

Учебно-методическое пособие

ISBN 978-5-907611-70-2

Работа рекомендована РИС ЮУрГГПУ
Протокол № 27, от 2022 г.

Редактор Е.М. Сапегина
Компьютерная верстка В.А. Белевитин

Издательство ЮУрГГПУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69

Подписано в печать 07.04.2022 г.
Формат 60x84 1/16
Объем 4 уч.-изд. л. – 8 усл.п.л.

Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ЮУрГГПУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69