

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ДГТУ)

Факультет «Транспорт, сервис и эксплуатация»
Кафедра «Эксплуатация транспортных систем и логистика»

Автомобильные материалы, их старение и износ

Конспект лекций. Вопросы для самопроверки.
Задания для самоконтроля

Ростов-на-Дону

2023

УДК 629.33.01

Составитель: канд. техн. наук, доцент С.Г. Курень

Автомобильные материалы, их старение и износ. Конспект лекций. Вопросы для самопроверки. Задания для самоконтроля. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2023. - 169 стр.

Лекции и контрольный материал по дисциплине «Автомобильные материалы, их старение и износ» содержат основные сведения по автомобильным конструкционным материалам, вопросы для контроля усвоения материала и самопроверки. Данная разработка предназначена для студентов всех форм обучения по направлению 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Печатается по решению методической комиссии факультета

«Транспорт, сервис и эксплуатация»

Рецензент – канд. техн. наук, доцент Н.С. Донцов

© Издательский центр ДГТУ, 2023

Содержание

	Стр.
Введение.....	6
Лекция 1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ	7
1.1. Требования, предъявляемые к металлам и сплавам.....	7
1.2. Химический состав, механические, физические и технологические характеристики металлов и сплавов.....	11
Лекция 2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ ЧУГУНЫ.....	13
2.1. Виды чугунов.....	13
2.2. Чугуны с пластинчатым и шаровидным графитом, ковкие чугуны.....	18
2.3. Специальные чугуны.....	20
Лекция 3. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ.....	21
3.1. Углеродистые стали. Углеродистые стали в автомобилестроении.....	21
3.2. Легированные стали. Преимущества легированных сталей.....	33
3.3. Стали перлитного класса.....	46
3.4. Стали ферритного класса.....	46
3.5. Стали аустенитного класса.....	47
3.6. Стали ледебуритного класса.....	49
3.7. Стали мартенситного класса.....	50
3.8. Стали конструкционного назначения.....	51
3.9. Стали с особыми свойствами.....	56
3.10. Легированные и низколегированные стали в автомобилестроении.....	68
3.11. Рессорно-пружинные, высоколегированные жаростойкие и жаропрочные стали.....	71
3.12. Марки сталей, чугунов и цветных сплавов, применяемых при изготовлении основных деталей отечественных автомобилей.....	71

Лекция 4. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ.....	72
4.1 Цветные алюминиевые, цинковые и магниевые сплавы.....	73
4.2 Цветные сплавы на медной и цинковой основе.....	74
4.3 Припои и антифрикционные сплавы	76
Лекция 5. МЕТАЛЛЫ И МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ.....	76
5.1. Металлы и материалы, применяемые при восстановлении автомобильных деталей сваркой, наплавкой и напылением.....	76
5.2. Металлы и материалы, применяемые для наращивания деталей электролитическими покрытиями.....	82
Лекция 6. КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ.....	85
6.1. Общие требования, предъявляемые к конструкционным материалам...	89
6.2. Конструкционная прочность материалов и критерии ее оценки.....	91
6.3. Методы повышения конструкционной прочности.....	100
Лекция 7. ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ.....	101
7.1. Виды разрушения. Классификация всех возможных видов разрушения.....	101
7.2. Наблюдаемые виды разрушения.....	102
7.3. Виды механического разрушения.....	104
Лекция 8. УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	113
8.1. Влияние внешних механических воздействий на усталость.....	117
8.2. Некоторые теории усталости и модель процесса разрушения при усталости.....	117
8.3. Влияние качества поверхности на усталость.....	120
8.4. Коррозионная усталость.....	124
8.5. Адсорбционная усталость.....	125
8.6. Особенности усталостного разрушения металлов при одновременном циклическом нагружении и нагружении трением.....	128
8.7. Роль оксидных пленок при адсорбционной усталости металла.....	131

Лекция 9. КОНСТРУКТИВНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	134
9.1 Конструктивные методы повышения износостойкости.....	134
9.2 Методы повышения износостойкости деталей и узлов трения машин в эксплуатации.....	142
Вопросы для самопроверки.....	147
Задания для самоконтроля.....	148
Лекция 10. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ.....	149
Лекция 11. СТАРЕНИЕ И ИЗНОС АВТОМОБИЛЕЙ. Старение автомобилей и их составных частей	156
Библиографический список.....	169

Введение

При эксплуатации автомобиля имеют место физическое изнашивание деталей, потеря усталостной прочности их материала. Как при эксплуатации автомобиля, так и при его хранении происходят изменения, связанные с коррозией, потерей жесткости, структурные изменения и химические превращения в металлах, потеря некоторых свойств (например, упругости, пластичности и др.). Процессы старения всегда связаны со временем. В связи с этим для решения задач ремонта необходимо знать законы старения, устанавливающие зависимость повреждений от времени. Например, толщины изношенного слоя, остаточного прогиба при деформации детали, площади или глубины поврежденного коррозией слоя в зависимости от наработки. Использование этих закономерностей позволяет прогнозировать потерю работоспособного состояния автомобилем и его составными частями.

Со временем разные детали автомобиля выходят из строя и их приходится менять. Причиной тому является износ деталей либо их дефекты. Все дефекты автомобильных деталей можно разделить на три группы: конструктивные, производственные и эксплуатационные. К конструктивным дефектам относятся те, которые являются следствием ошибок, допущенных на этапе конструирования автомобиля. Производственные дефекты - это дефекты, возникшие в результате ошибок при изготовлении или ремонте транспортного средства. Что касается эксплуатационных дефектов, то они возникают либо по причине неправильного технического обслуживания, либо из-за естественного износа. Причиной возникновения естественного износа деталей является постоянное трение между прилегающими поверхностями, а также усталость поверхностного слоя материалов

Лекция 1. Конструкционные металлические материалы в автомобилестроении

Автомобильные детали изготавливаются из углеродистых, легированных, специальных сталей, чугунов различной структуры, цветных сплавов, отливаемых на различной основе. Соответственно при их восстановлении используются разнообразные ремонтные материалы. Выбор способов, технологических вариантов и режимов восстановления деталей непосредственно связан со знанием химического состава, структуры, механических, физических и технологических характеристик тех металлов и сплавов, из которых они изготовлены.

1.1. Требования, предъявляемые к металлам и сплавам

В процессе эксплуатации автомобилей рабочие поверхности большинства, их деталей подвержены изнашиванию под влиянием сил трения, коррозионных воздействий и других причин. Кроме того, многие детали воспринимают при работе значительные динамические нагрузки, возникающие при сгорании газов в камере сгорания цилиндров двигателей, из-за действия инерционных сил, при нарушении соосности сопряженных агрегатов, механизмов и деталей, в результате частотных колебаний, при торможении автомобиля, ударах колес о препятствия (неровности дороги) и по другим причинам. Многие детали воспринимают систематические переменные нагрузки и поэтому могут подвергаться усталостным разрушениям. К таким деталям в первую очередь следует отнести продольные балки и поперечины рам, рессорные листы, пружины подвески, полуоси и др.

Сопряженные рабочие поверхности автомобильных деталей подвержены различным видам механического и коррозионно-механического изнашивания, в частности абразивному и газоабразивному (клапаны, гильзы цилиндров и др.), усталостному (рабочие поверхности зубчатых венцов шестерен, подшипников качения и т. п.), окислительному (поршни, головки

цилиндров, поршневые кольца и др.), изнашиванию при фреттинг-коррозии (рессорные листы), а также комбинированному воздействию перечисленных и других видов изнашивания (гильзы цилиндров, клапаны и др.).

В отношении смазки условия работы сопряжений деталей автомобиля не одинаковы. Лишь подшипники коленчатых валов (коренные и шатунные) работают при установившемся режиме в условиях гидродинамической смазки, работа некоторых деталей (например, подшипников распределительных валов) протекает на границе условий гидродинамической и полужидкостной смазок; большинство же деталей работает при граничной смазке. Таким образом, можно заключить, что соответственно характеру и величинам воспринимаемых нагрузок, видам трения и условиям смазки сопряжения узлов и агрегатов автомобилей работают в сложных условиях.

Особенности использования автомобилей не позволяют при разработке их конструкций с целью повышения надежности и увеличения ресурса идти по пути увеличения сечений, габаритных размеров и массы деталей. Поэтому к материалам, применяемым при их производстве и восстановлении, предъявляются высокие требования. Они должны надежно обеспечивать статическую и динамическую прочность изготавливаемых из них деталей, гарантировать высокую износостойкость трущихся поверхностей, а в ряде случаев также температурную и коррозионную стойкость.

Указанным требованиям хорошо отвечают легированные стали. В нормализованном и особенно улучшенном состоянии они обеспечивают при ограниченных сечениях необходимую прочность изготавливаемых из них деталей, а в результате химико-термической обработки с последующими закалкой и низкотемпературным отпуском - высокую твердость и износостойкость рабочих поверхностей при больших удельных нагрузках. За счет соответствующего подбора легирующих компонентов у изготавливаемых деталей достигаются пружинящие свойства, коррозионная стойкость, жаропрочность и другие специальные качества. В автомобилестроении

широко распространены легированные стали при большом разнообразии используемых групп, марок и химического состава.

Однако нельзя не учитывать, что стоимость легированных сталей намного превышает стоимость качественных углеродистых сталей. Поэтому наряду с легированными при изготовлении автомобильных деталей применяются более дешевые низколегированные и качественные углеродистые стали. Они применяются во всех случаях, когда это не вызывает снижения надежности и ресурса соответствующих деталей, а следовательно, и тех агрегатов и узлов, в конструкцию которых они входят. Например, такие детали, как полуоси, шкворни поворотной цапфы, поршневые пальцы у грузовых тяжелых машин, изготавливаются, как правило, из легированных сталей; у легковых автомобилей и грузовиков невысокой грузоподъемности для производства аналогичных деталей обычно используются качественные углеродистые стали марок сталь 40 и сталь 45 (при поверхностной закалке ТВЧ).

В качестве заготовок автомобильных деталей используются поковки, штамповки, черное и цветное литье. Первые два вида заготовок отличаются наиболее благоприятной структурой металла, а, следовательно, и наилучшими механическими свойствами изготавливаемых из них деталей. Поэтому в конструкциях автомобилей кованых и штампованных деталей большинство. Исходным материалом для изготовления поволоков и штамповок является металлопрокат. Однако из-за относительно высокой стоимости металлопроката и сложности операций обработки металлов давлением в тех случаях, когда нагрузки деталей ограничены, целесообразно вместо поволоков использовать отливки (при изготовлении кронштейнов, педалей, корпусов и т. д.). При изготовлении деталей особенно сложной формы литье часто является единственно возможным способом изготовления заготовок (блоков двигателей, головок блока, картеров коробок передач, картеров редукторов и других деталей). Наиболее дешевым видом черного литья, но вместе с тем наименее прочным является чугунок с пластинчатым графитом. Механические

качества чугуна могут быть повышены за счет его модификации, легирования, специальной термической обработки. В связи с этим в автомобильной промышленности широко применяются чугуны с шаровидным графитом, легированные и ковкие чугуны. Ковкие чугуны обеспечивают наивысшие механические качества изготавливаемых из них деталей, однако дороги и сложны по технологии их термической обработки. Чугуны с шаровидным графитом по своим механическим качествам приближаются к ковким, но значительно дешевле и проще по технологии изготовления заготовок. Поэтому в последние годы в автомобильной промышленности материал ряда деталей, прежде изготавливавшихся из ковкого чугуна, заменен на чугун с шаровидным графитом.

Для дальнейшего повышения динамических качеств автомобилей большое значение имеет максимально возможное снижение массы. Этому в значительной мере способствует изготовление автомобильных деталей из сплавов на алюминиевой, цинковой, магниевой основе, а также синтетических материалов, область применения которых с годами непрерывно увеличивается.

Для обеспечения высоких и стандартных качеств автомобильных деталей и одинаковых условий их обрабатываемости стали, чугуны и цветные металлы должны обладать постоянными механическими и технологическими свойствами, не меняющимися существенно в зависимости от партии или плавки. Поэтому при изготовлении ответственных деталей автомобилей часто применяют качественные углеродистые стали, в которых колебание содержания углерода ограничено до 0,05 % против 0,09 % в тестированных сталях. По этой же причине находят применение чугуны и цветные металлы заводских марок с несколько измененным процентным содержанием отдельных компонентов по отношению к стандартным маркам. В некоторых случаях в автомобилестроении находят применение марки легированных сталей и других металлов и сплавов, не предусмотренные ГОСТом.

1.2. Химический состав, механические, физические и технологические характеристики металлов и сплавов

Химический состав влияет на механические, физические и технологические свойства металлов и сплавов. На свойства сталей в первую очередь оказывает влияние процент содержания в них углерода. Для производства автомобильных деталей применяют, как правило, мало- и среднеуглеродистые качественные и высококачественные стали, содержащие до 0,5 % углерода. При изготовлении пружин и рессор применяют высокоуглеродистые стали с содержанием углерода до 0,70 %. Кроме того, высокоуглеродистые стали широко используются в автостроении и авторемонтном производстве при изготовлении режущего инструмента.

С повышением содержания углерода в стали увеличивается ее временное сопротивление и предел текучести, твердость в нормализованном и отпущенном состоянии и уменьшаются относительное удлинение и ударная вязкость. Кроме того, с увеличением содержания углерода в стали снижается ее свариваемость и возрастает твердость после закалки и отпуска. Практически закалке подвергают углеродистые стали с содержанием углерода от 0,40 % и выше (некоторые легированные стали принимают закалку при меньшем процентном содержании углерода). Малоуглеродистые стали (углеродистые и легированные) с содержанием углерода до 0,30 % и ниже с целью придания им высокой поверхностной твердости при сохранении вязкой и прочной сердцевины часто подвергают химико-термической обработке с последующей закалкой и низкотемпературным отпуском.

На свойства чугунов в первую очередь оказывает влияние форма графитизированного в них углерода (содержание последнего в автомобильных деталях обычно колеблется в пределах 2,2-3,8 %). Наилучшей прочностью и пластичностью обладают ковкие чугуны с округлыми (глобулярными) включениями графита, близки к ним по структуре и свойствам высокопрочные чугуны, модифицированные магнием;

затем идут модифицированные чугуны, получаемые с использованием других модификаторов; худшими качествами обладают серые чугуны с пластинчатым графитом.

Механические и другие характеристики сталей и чугунов могут быть значительно повышены за счет введения в их состав легирующих компонентов.

Механические характеристики металлов и сплавов определяются экспериментально на образцах при различных видах их нагружения.

Обычно испытания образцов проводят на растяжение, изгиб, ударную вязкость, усталостную выносливость и поверхностную твердость. Чугуны испытывают также на сжатие. Существуют и другие виды испытаний, однако для конструкционных автомобильных материалов они используются редко.

К основным физическим характеристикам металлов и сплавов следует отнести плотность (по системе СИ кг/м^3), коэффициент линейного расширения $10^{-6}\text{мм}/(\text{мм} \cdot ^\circ\text{C})$, температуру плавления в градусах Цельсия (или К) и температурные точки фазовых превращений аустенита в перлит (A_{r1}) и феррит (A_{r3}) и перлита (A_{c1}) и феррита (A_{c3}) в аустенит. Указанные физические характеристики в значительной степени определяют рациональные температурные режимы плавки,ковки и термической обработки металлов и сплавов, их технологические свойства.

Под технологическими характеристиками обычно понимают способность металлов и сплавов подвергаться тем или иным технологическим операциям с целью получения изделий с необходимыми свойствами. К технологическим характеристикам относят жидкотекучесть, деформируемость, прокаливаемость, свариваемость, обрабатываемость резанием и др. Применительно к авторемонтным и автотранспортным предприятиям наибольшее практическое значение имеют такие технологические характеристики металлов и сплавов, как свариваемость и механическая обрабатываемость.

Механическую обрабатываемость металлов и сплавов обычно оценивают по износу режущей части инструмента, выполненного из быстрорежущей стали P18 или твердого титанокобальтового сплава T5K10. За эталон при этом чаще всего принимают нормализованную качественную углеродистую сталь 45 (HB 170-180). Существуют и другие методы оценки механической обрабатываемости металлов, в частности по силе резания. В этом случае полученные результаты обычно сравнивают со значением силы резания, возникающей при обработке стали A12.

Свариваемость определяет способность металлов и сплавов получать при оптимальной технологии прочный и износостойкий шов или наплавленный металл без существенного снижения эксплуатационных качеств восстановленной или изготовленной детали или сварного узла. Обычно свариваемость оценивается терминами "хорошая" (без ограничений), "вполне удовлетворительная", "удовлетворительная", "ограниченная" (затрудненная), "весьма затрудненная" и др. Указанные термины устанавливаются согласно накопленному производственному опыту и по результатам лабораторных исследований.

Лекция 2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ ЧУГУНЫ

2.1. Виды чугунов

Сплавы железа с углеродом, содержащие более 2,14% углерода, называют чугунами. Представленные на диаграмме железо — углерод чугуны называют белыми по виду излома. Белый цвет излома объясняется тем, что в белых чугунах весь углерод находится в связанном состоянии. В соответствии с фазовым составом белых чугунов ($\Phi + \text{Ц}$) атомы углерода находятся в связанном состоянии — часть в виде твердого раствора внедрения $\text{Fe}_3(\text{C})$ с объемноцентрированной кубической кристаллической

решеткой феррита, и часть в виде химического соединения с железом — цементита Fe_3C .

Белые чугуны в качестве конструкционного материала не используют вследствие их хрупкости. Это вызвано наличием в структуре белых чугунов ледебурита Л (П + Ц), который обладает высокой твердостью 4 000 МПа и нулевым значением относительного удлинения при растяжении.

Около 80 % белых чугунов используют в качестве полуфабриката для выплавки стали. Оставшиеся 20 % перерабатывают в так называемые графитизированные чугуны, в которых часть углерода переводят в свободное состояние в виде самостоятельной фазы графита. Графитизированные чугуны широко применяют в машиностроении в качестве дешевого конструкционного материала литейной технологии.

Графит является одной из аллотропных модификаций углерода с гексагональной кристаллической решеткой. Атомы углерода в кристаллической решетке графита расположены в виде параллельных слоев (рис. 1). Связь между атомами в слое осуществляется сильными ковалентными связями, а между слоями действуют более слабые молекулярные связи. Кристаллит графита можно представить в виде многослойной стопки огромных плоских двумерных молекул со слабыми связями между слоями. Размеры атомных плоскостей графита могут достигать $1 \cdot 10^4$ нм. Вследствие малой межслоевой прочности механические свойства графита низкие. При рассмотрении структуры графитизированных чугунов графит считают фазой, имеющей практически нулевую прочность. Графитовые включения рассматривают как пустоты в структуре чугуна. Вместе с тем наличие в структуре свободного графита определяет ряд преимуществ графитизированного чугуна перед сталью:

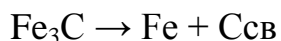
хорошее стружкообразование: стружка при обработке чугуна сыпучая, а не непрерывная как у стали;

хорошие антифрикционные свойства благодаря смазывающему действию графита;

высокие демпфирующие свойства (гашение вибраций);

практически полное отсутствие чувствительности к поверхностным дефектам и концентраторам напряжений в виде надрезов, отверстий и других нарушений целостности детали.

На диаграмме железо — углерод, полученной в условиях естественного очень медленного охлаждения железоуглеродистых сплавов, графит отсутствует. Образование графита в чугунах является результатом искусственного вмешательства в процесс первичной кристаллизации жидкого раствора углерода в железе или создания условий для выделения свободного углерода $C_{св}$ в виде графита в процессе распада цементита при вторичной кристаллизации чугуна:



Форма графитных включений во многом определяет механические свойства графитизированных чугунов и зависит от условий кристаллизации.

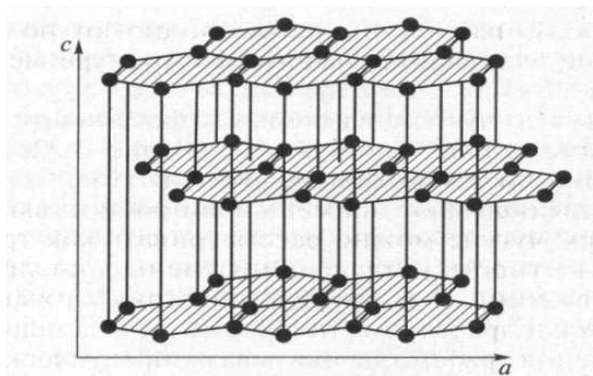


Рис. 1. Кристаллическая решетка графита: а, с — кристаллографические оси

Графитизированные чугуны классифицируют по двум критериям: по форме включений графита и структуре металлической основы чугуна.

Серыми называют чугуны, в которых включения графита в плоскости шлифа имеют пластинчатую форму (рис. 2, а). Название чугуны получили по темно-серому цвету излома.

Серые чугуны обладают наименьшей прочностью. Пластинки графита в сером чугуне можно рассматривать как трещины, нарушающие целостность металла. Они уменьшают прочность чугуна при растяжении. Чем крупнее пластинки графита и менее равномерно их распределение по объему, тем

меньше прочность чугуна. Включения графита не оказывают практического влияния на прочность при сжатии, так как при таком нагружении трещины закрываются. Предел прочности чугуна при сжатии в 3 — 5 раз больше, чем при растяжении. Нарушение сплошности включениями графита заметно снижают модуль упругости чугуна.

Ковкий чугун имеет хлопьевидные включения графита (рис. 2, б). Название достаточно условное, так как ковкие чугуны ковать нельзя, их механические свойства не позволяют осуществить пластическую деформацию. Они названы ковкими вследствие их относительно высокой пластичности по сравнению с серыми чугунами. Относительное удлинение при растяжении у серого чугуна настолько мало, что не входит в контрольные показатели свойств, а у ковкого чугуна может превышать 10 %.

В высокопрочных чугунах графит имеет шаровидную форму (рис. 2, в). Название отражает высокие механические свойства таких чугунов. Шаровидные нарушения сплошности металлической основы оказывают меньшее влияние на механические свойства высокопрочного чугуна, чем пластинчатые надрезы в сером чугуне. Разновидностью серого чугуна является чугун с вермикулярным графитом (рис. 2, г).

В графитизированных чугунах углерод содержится как в связанном, так и в свободном состояниях.

Долю свободного углерода $C_{св}$ в общем содержании углерода $C_{общ}$ называют степенью графитизации. Структура металлической основы чугуна определяется содержанием в ней связанного углерода $C_{связ}$.

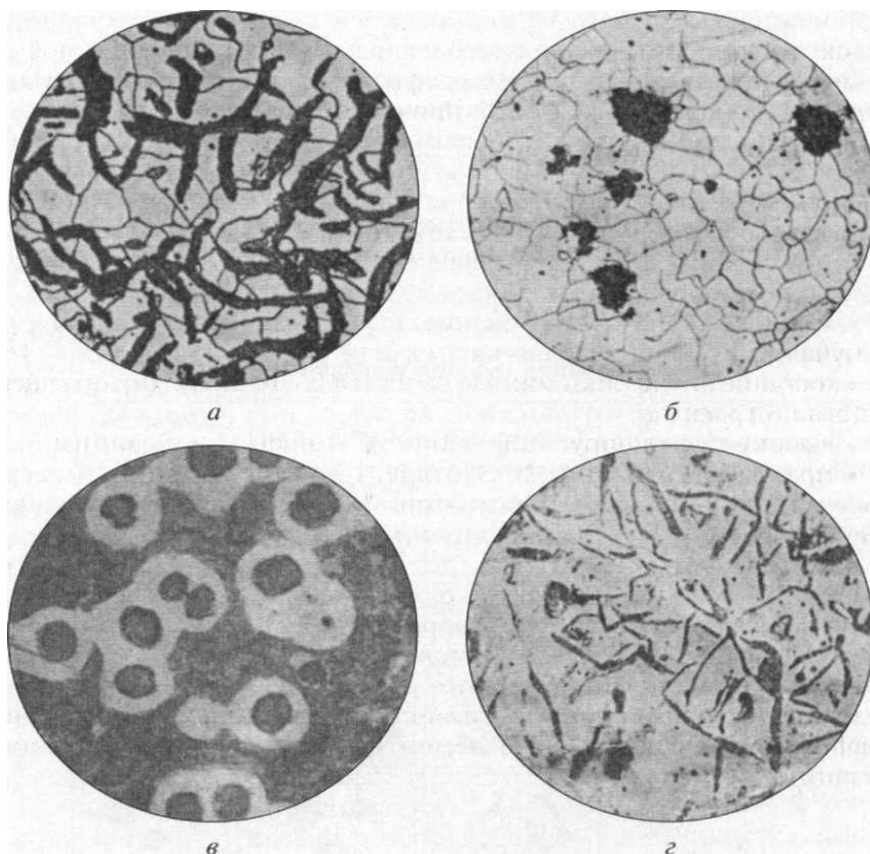


Рис. 2. Микроструктура графитизированных чугунов (x250): а — серый; б — ковкий; в — высокопрочный; г — с вермикулярным графитом

Таблица 1. Классификация графитизированных чугунов

Характеристика металлической основы		Серый чугун	Ковкий чугун	Высокопрочный чугун
		Форма графита		
Содержание $C_{\text{связ}}, \%$	Структура	пластинчатая	хлопьевидная	шаровидная
0,8	Перлит (П)			
0,033 ... 0,8	Феррит и перлит (Ф + П)			
До 0,03	Феррит (Ф)			

→ Прочность, пластичность

↑ Твердость
Износостойкость

При производстве на автозаводах чугуновых автомобильных деталей широко используются тестированные чугуны с пластинчатым и шаровидным графитом, ковкие чугуны, а также специальные чугуны — легированные с улучшенными или специфическими, по отношению к тестированным маркам, свойствами; такие чугуны применяются согласно разработанным и утвержденным техническим условиям предприятий или объединений автомобильной промышленности.

2.2. Чугуны с пластинчатым и шаровидным графитом, ковкие чугуны

Чугуны с пластинчатым графитом обозначаются буквами СЧ, с шаровидным графитом — ВЧ, ковкие чугуны — КЧ. Цифры после обозначения марки у чугунов с пластинчатым графитом и чугунов с шаровидным графитом соответствуют обеспечиваемому временному сопротивлению на растяжение, выраженному в кгс/мм². Цифры в обозначениях марок ковок чугунов означают: первая — временное сопротивление разрыву, кгс/мм²; вторая — относительное удлинение, %. Ковкие чугуны по сравнению с чугунами с пластинчатым графитом отличаются значительно более высокими прочностью и пластичностью. Однако в последние годы высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ЧШГ) благодаря сочетанию ряда положительных физико-механических свойств с высокой технологичностью вытесняет в ряде случаев при производстве автомобильных деталей ковкий чугун (КЧ), литую и даже кованую сталь.

Чугуны при разливке в формы с целью размельчения включений графита модифицируют введением в ковш мелкодисперсных невыгорающих примесей, в частности ферросилиция, силикокальция, различных сложных лигатур, включая редкоземельные металлы (РЗМ); при отливке деталей из ЧШГ в оболочковые формы применяют в специальной защитной среде сильнодействующие модификаторы на основе магния. Наиболее

распространенные в автостроении типы и марки чугунов и примеры изготавливаемых из них деталей приведены в табл. 2.

Таблица 2. Наиболее распространенные в конструкциях автомобилей типы и марки чугунов и примеры изготавливаемых деталей

№	Типы чугунов	Марки чугунов	Изготавливаемые детали
1	Серые	СЧ15 СЧ20 СЧ25	Впускные и выпускные трубопроводы двигателей, блоки цилиндров двигателей, маховики, нажимные диски сцеплений, блоки цилиндров компрессоров, картеры и крышки картеров коробок передач, мокрые гильзы цилиндров и гильзы двигателей воздушного охлаждения, тормозные барабаны, цилиндры гидротормозов и сцеплений и др.
2	Легированные и малолегированные	По ТУ заводов	Монометаллические гильзы цилиндров, клапанные гнезда, гильзы цилиндров двигателей, поршневые кольца, диски сцеплений
3	Высоколегированные	По ТУ заводов	Вставки в верхнюю часть мокрых гильз цилиндров, клапанные гнезда
4	Высокопрочные с шаровидным графитом	ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, по ТУ заводов	Поршневые кольца, коромысла клапанов, коленчатые валы, распределительные валы, картеры коробок передач, ступицы колес, тормозные барабаны, башмаки рессор, кронштейны двигателей и подвески
5	Ковкие	КЧ35-10, КЧ37-12	Картеры главных передач, картеры задних мостов, картеры рулевых механизмов, чашки дифференциала, ступицы колес, тормозные барабаны, кронштейны, педали
6	Металлокерамические, спекаемые	По ТУ заводов	Направляющие втулки клапанов
7	Отбеленные	По ТУ заводов	Для наплавки тарелок толкателей, коромысел клапанов, кулачков распределительных валов при их ремонте

2.3. Специальные чугуны

При производстве автомобильных деталей используются антифрикционные и различные специальные легированные чугуны. Из легированных чугунов изготавливаются, как правило, гильзы цилиндров двигателей, а вставки в верхнюю часть некоторых из них — из высоколегированного чугуна. Поршневые кольца современных автомобильных двигателей в большинстве случаев изготавливаются из низколегированных или высокопрочных чугунов (ЧШГ). Серый низколегированный чугун по прочностным качествам значительно уступает высокопрочному. Легированные и высоколегированные чугуны, а также марганцевые чугуны аустенитного класса применяются для изготовления клапанных гнезд и коромысел клапанов; для производства последних используют также ЧШГ; для наплавки толкателей применяют низколегированный отбеленный чугун. Некоторые чугунные детали (направляющие втулки клапанов, подшипниковые втулки, поршневые кольца и др.) могут изготавливаться не литьем, а спеканием из порошкообразных шихтовых материалов (при температуре около 1100°C под давлением $6,5 \cdot 10^3$ кгс/см² в течение примерно 2 ч.). В качестве исходных материалов при этом используются железный, графитовый, хромовый и медный порошки. Металлокерамические детали обладают высокой износостойкостью благодаря способности впитывать смазку в имеющиеся поры.

Лекция 3. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

Конструкционные стали подразделяются на углеродистые и легированные; те и другие выпускаются разных классов и назначений и регламентируются разными государственными стандартами. В автомобиле-строении при производстве деталей используются стали многих классов и марок, причем, иногда со скорректированным по отношению к

ГОСТу химическим составом, или даже своих новых марок, утвержденных по техническим условиям (ТУ) предприятий. В авторемонтном производстве (АРП) также применяются многие стали при изготовлении отдельных деталей, нестандартного оборудования, приспособлений. Кроме того, знание материалов, из которых изготовлены автомобильные детали, необходимо ремонтникам при выборе оптимальных вариантов технологических процессов и маршрутов их восстановления.

3.1. Углеродистые стали. Применение углеродистых сталей в автомобилестроении

В настоящее время сталь является основным видом продукции предприятий черной металлургии. Номенклатура стальной продукции весьма обширна. Известны не менее 2000 марок сталей. Из общего количества выплавляемой стали около 80 % составляет углеродистая сталь. Оставшиеся 20 % приходятся на долю легированных сталей со специальными свойствами. С развитием современной техники к свойствам сталей предъявляются новые повышенные требования, в связи с чем объем производства легированных сталей в дальнейшем будет возрастать.

Углеродистая сталь относится к самым дешевым металлическим материалам промышленного производства и обладает оптимальным соотношением цена — уровень потребительских свойств.

К главному техническому достоинству углеродистых сталей следует отнести их высокий модуль упругости ($E = 210 \text{ ГПа}$), что позволяет использовать углеродистые стали в таких силовых элементах конструкции, где жесткость материала определяет работоспособность крупногабаритной конструкции. Примером являются несущие фермы мостов, цилиндрические оболочки разного назначения и др. Необходимо также отметить, что модуль упругости относится к структурно нечувствительным характеристикам материала. Величина модуля упругости определяется, главным образом, свойствами вещества на атомарном и кристаллическом уровнях структуры, а

различные методы повышения уровня потребительских свойств стали практически не влияют на модуль упругости. Например, такой наиболее широко используемый способ воздействия, как термическая обработка, повышает твердость и прочность стали до 5 раз, но изменение модуля упругости при этом составляет не более 5 %. Это позволяет использовать углеродистые стали для изготовления крупногабаритных деталей без их последующей термической обработки, удорожающей производство. Механические свойства термически не упрочненной углеродистой стали в большинстве случаев обеспечивают прочность детали, площадь и форма поперечного сечения которой выбраны по критерию необходимой жесткости детали.

К несомненным достоинствам углеродистой стали относятся и ее технологические свойства: хорошие литейные свойства, легко поддается обработке давлением, резанием, хорошо сваривается, что позволяет изготавливать детали из углеродистой стали наиболее производительными способами массового производства. Все это усиливает технико-экономическую конкурентоспособность углеродистой стали.

Сталями считают железоуглеродистые сплавы, содержащие до 2,14% углерода, однако, практическое применение нашли только стали, содержащие углерода до 1,3%. Это вызвано тем, что пропорциональный содержанию углерода рост прочности стали приостанавливается по достижении его содержания 0,8 %, и дальнейшее повышение содержания углерода приводит к падению прочности (рис. 3). Продолжающееся с увеличением содержания углерода падение пластичности и вязкости стали резко ухудшает ее потребительские свойства, а продолжающийся рост твердости не компенсирует отрицательного влияния содержания углерода на прочность и вязкость стали.

Рассмотренное влияние содержания углерода на механические свойства стали находит объяснение в пропорциональном содержанию углерода изменении структуры стали. В доэвтектоидной стали увеличение содержания

углерода от 0,03 до 0,8 % приводит к изменению структуры стали от феррита до перлита с соответствующим изменением свойств: твердость и прочность возрастают, а пластичность уменьшается. В заэвтектоидной стали в структуре появляется цементит, с увеличением содержания углерода в стали доля цементита в структуре также возрастает. Это приводит к снижению прочности, что сопровождается уменьшением пластичности, и дальнейшему росту твердости.

В стали кроме углерода всегда присутствуют неизбежные примеси, которые попадают в сталь в процессе ее выплавки из исходного сырья (железная руда, каменноугольный кокс и др.), воздушной атмосферы, а также в виде частиц футеровки металлургических агрегатов и разливочных устройств. Неизбежные примеси или продукты их взаимодействия с железом уменьшают полезное («живое») сечение стальных деталей, снижая их прочность.

Такие примеси, как сера и фосфор, являются вредными.

Сера образует с железом химическое соединение — сульфид железа FeS. В процессе первичной кристаллизации стали образуется эвтектика состава Fe— FeS с температурой плавления около 1000°C, причем кристаллизация сульфидной эвтектики как легкоплавкой массы происходит в последнюю очередь, т. е. располагается она по границам зерен. В процессе последующей горячей обработки слитка давлением (прокат, ковка), проводимой при температуре выше 1000 °C, границы зерен оплавляются, а при деформации в слитке появляются трещины. Для устранения этого дефекта, называемого красноломкостью, в состав стали вводят марганец, который связывает серу в сульфид марганца MnS. С железом сульфид марганца не образует легкоплавкую эвтектику, температура его плавления (около 1600 °C) выше температур обработки слитка давлением и при этих температурах сульфид марганца пластичен, не хрупок, т. е. явление красноломкости предотвращается.

Фосфор, растворяясь до 1,2% в феррите, приводит к хладноломкости стали, которую характеризуют температурой охрупчивания стали 50. Считают, что каждые 0,01 % фосфора в составе стали приводят к повышению порога хладноломкости на 25 °С. Борьба с данным дефектом стали крайне затруднительна и основана на устранении загрязнения фосфором исходного сырья на стадии подготовки ее к металлургическому производству.

Вредные примеси склонны к ликвации, поэтому даже при их содержании в стали в пределах регламентированных норм возможно наличие зон, обогащенных фосфором или серой. Это приводит к необходимости выявления ликвации вредных примесей в стали. Методика визуального наблюдения ликвации основана на травлении макрошлифа соответствующими реактивами.

Образующиеся CO и CO₂ выделяются из жидкого металла в виде множественных пузырьков, создавая эффект кипения стали. Те газовые включения, которые остаются в теле затвердевшего слитка (рис. 4), в процессе последующей горячей прокатки затвердевшего слитка завариваются, в частности, прокат кипящей стали не имеет брака по несплошности. Раскисленную марганцем сталь называют кипящей и обозначают в маркировке стали буквами «кп». Кипящая сталь наиболее дешевая.

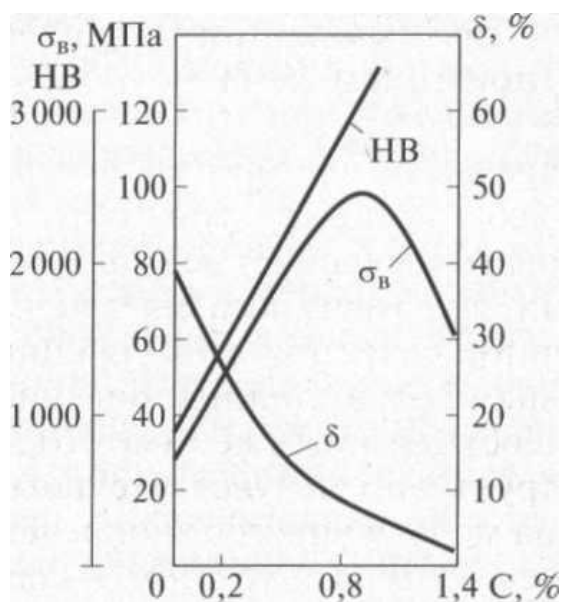


Рис. 3. Влияние содержания углерода в стали на ее механические свойства: НВ, σ_B , δ — соответственно твердость, временное сопротивление (предел прочности при растяжении), относительное удлинение при растяжении (пластичность)

Благодаря низкому содержанию кремния она обладает высокими вязкостью и пластичностью. Поэтому кипящую сталь используют преимущественно в виде листового проката для изготовления деталей методом холодной штамповки. Самое массовое применение кипящая сталь находит в производстве кузовных деталей транспортных средств, в частности, автомобиля.

Для максимального удаления кислорода сталь раскисляют последовательно такими раскислителями, как марганец, кремний и алюминий, связывая кислород в силикатный шлак сложного состава, который удаляют. После введения всех раскислителей активность кислорода снижается до определенных пределов в результате раскисления, бурное выделение CO и CO_2 прекращается, разлитая в изложницы сталь ведет себя спокойно, газы из нее почти не выделяются. Такую сталь называют спокойной и обозначают в маркировке буквами «сп».

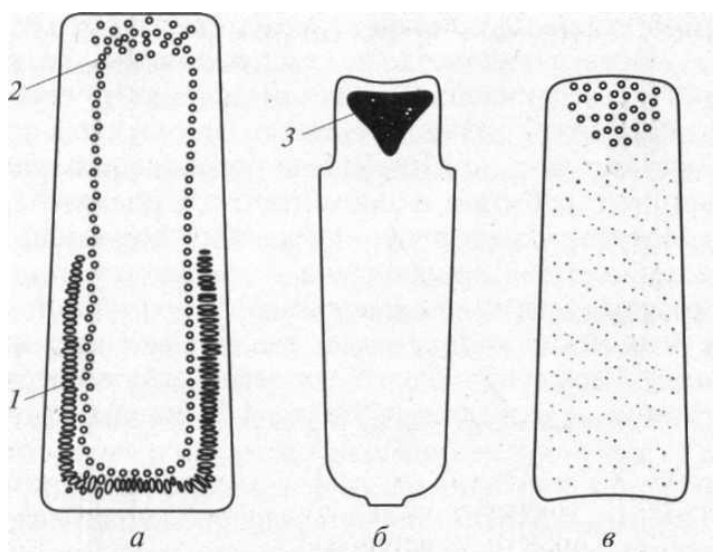


Рис. 4. Газовые включения в слитках стали:
а — кипящей; б — спокойной; в — полуспокойной; 1 — первичные пузыри; 2 — вторичные пузыри; 3 — усадочная раковина

Спокойная сталь обладает лучшими потребительскими свойствами, чем кипящая. Слиток такой стали плотный и однородный.

Спокойная сталь предназначена для изготовления ответственных деталей машин и оборудования, она более дорогая, чем кипящая сталь. Удорожание вызвано как введением дополнительных раскислителей (ферросилиций и силикоалюминий), так и образованием усадочной раковины в верхней части слитка, которую отрезают и пускают в переплав. Это

значительно снижает выход годного металла. Иногда при раскислении марганцем и кремнием из стали удаляется не весь кислород. Оставшийся растворенный кислород вызывает кратковременное кипение металла. Такую сталь называют полуспокойной. Она занимает промежуточное положение между кипящей и спокойной сталью по стоимости и потребительским свойствам. Полуспокойную сталь маркируют буквами «пс».

Марганец и кремний, вводимые в сталь в качестве технологической добавки, помимо технологического влияния оказывают непосредственное влияние на свойства стали, как примеси они повышают прочность стали.

Кислород оказывает отрицательное влияние на свойства стали, так как он образует оксиды, которые вместе с нитридами, — продуктами химического взаимодействия атмосферного азота с металлом — входят в состав неметаллических включений. В процессе прокатки слитка хрупкие оксиды располагаются в направлении прокатки в виде строчечных включений (рис. 5). Неметаллические включения снижают прочность стали, поэтому их содержание в стали регламентируют. Для контроля литой (слитки) и деформированной (прокат) стали применяют метод сравнения микрошлифа с эталонными шкалами. Используется пятибалльная шкала неметаллических включений, согласно которой с увеличением номера балла загрязненность стали неметаллическими включениями возрастает (рис. 6).

Неметаллические включения имеют темный цвет. Чтобы не спутать их с темными границами зерен, которые выявляются при травлении микрошлифа, для определения неметаллических включений используют нетравленные микрошлифы. Анализ проводят при стандартном увеличении $\times 100$, которое соответствует увеличению эталонных образцов.

Мелкозернистые материалы имеют наиболее благоприятное сочетание физико-механических свойств. Поэтому величина зерна является одной из важнейших характеристик стали. Величину зерна оценивают при помощи эталонной шкалы зернистости стали (рис. 7). Зерна исследуемого образца стали выявляют путем травления поверхности микрошлифа химическими

реактивами. Шкала эталонных размеров зерен десятибалльная. Увеличение номера шкалы соответствует уменьшению величины зерна. Для определения величины зерна, так же как в случае неметаллических включений, используют увеличение $\times 100$.

Углеродистые стали классифицируют по назначению и качеству.

По назначению углеродистые стали разделяют на конструкционные и инструментальные. Стали конструкционного назначения используют для изготовления деталей машин и оборудования, строительных и других конструкций. Из сталей инструментального назначения изготавливают режущий и штамповый инструмент для обработки материалов, а также измерительный инструмент.

Назначение сталей определяется содержанием в них углерода, которое влияет на структуру и свойства сталей. Стали с содержанием углерода до 0,7 % называют конструкционными. По содержанию углерода они относятся к доэвтектоидным сталям. Их структура представлена зернами феррита Φ и перлита Π , обеспечивающими достаточную для конструкционного применения пластичность. Стали, содержащие 0,7... 1,3 % углерода, называют инструментальными. Это стали эвтектоидного и заэвтектоидного состава. Структура их состоит из перлита и цементита. С повышением содержания углерода прочность и пластичность заэвтектоидной стали падают (см. рис. 3), что затрудняет возможность использования их в качестве конструкционного материала. Но при этом возрастает твердость, которая является основной характеристикой инструмента.

В основе классификации сталей по качеству лежит содержание вредных примесей — серы и фосфора. По допустимому содержанию серы и фосфора углеродистые стали подразделяют на стали обыкновенного качества (до 0,05 % каждой из примесей), качественные (до 0,04 % каждой) и высококачественные (до 0,03 % каждой).

Наиболее широкое применение получили углеродистые стали обыкновенного качества как самый дешевый материал конструкционного

назначения. Объем производства этой группы сталей составляет около 50 % суммарного выпуска всех углеродистых сталей. В основном конструкционные углеродистые стали обыкновенного качества используют в строительстве, широко применяют в сельскохозяйственном машиностроении и в путевом хозяйстве железнодорожного транспорта. Качественные и высококачественные конструкционные углеродистые стали также нашли многостороннее применение в технике.

В обозначение марки углеродистой конструкционной стали обыкновенного качества входят буквы Ст, цифры 0 — 6 (условный номер марки в зависимости от химического состава стали, с увеличением номера содержание углерода в стали возрастает) и буквы, определяющие степень раскисления стали (кп — кипящая, пс — полуспокойная, сп — спокойная). Например, марки Ст1кп; Ст2пс; Ст3сп.

Качественные углеродистые конструкционные стали маркируют двузначным числом, указывающим среднее содержание углерода в сотых долях процента, например 08; 10; 55. Если стали полностью не раскислены, в обозначение добавляют буквы кп, пс. Например, сталь 15кп, 20 пс. (Для спокойной стали буквы не добавляют.)

Инструментальные стали обыкновенного качества не производятся.

Инструментальные углеродистые качественные стали маркируют буквой У (углеродистая), и числом, указывающим среднее содержание углерода в десятых долях процента. Например, У7, У8 — У13. В обозначении высококачественных сталей любой группы в конце марки указывается буква А. Например, У10А, 45А.

Таким образом, маркировка металлопродукции содержит определенную информацию. Примеры расшифровки некоторых марок сталей представлены далее:

Ст3кп — углеродистая сталь конструкционного назначения, обыкновенного качества, т.е. содержит серы около 0,05 % и фосфора около 0,05 %, а, следовательно, указаны значения временного сопротивления

(предела прочности при растяжении) $\sigma_{\text{вн}}$ относительного удлинения при растяжении δ ; кипящая, т.е. раскислена марганцем; обладает высокими вязкостью и пластичностью, поэтому рекомендована для холодной обработки давлением; цифра 3 — номер марки стали;

сталь 45 — углеродистая сталь конструкционного назначения с содержанием углерода 0,45 %, т. е. она доэвтектоидная, имеет структуру в равновесном состоянии $\Phi + \Pi$ (феррит и перлит); качественная, т.е. содержит серы не более 0,04 % и фосфора не более 0,04 %; спокойная (в марках качественных конструкционных сталей буквы сп не указывают);

У12А — углеродистая сталь инструментального назначения с содержанием углерода 1,2 %, т.е. она заэвтектоидная, имеет структуру в равновесном состоянии $\Pi + \text{ЦП}$ (перлит и цементит вторичный); высококачественная (буква А в конце марки), т.е. содержит серы не более 0,03 % и фосфора не более 0,03 %.

Некоторые виды углеродистых сталей маркируются внесистемно, например, автоматные стали, применяемые для изготовления болтов, гаек, винтов и других крепежных деталей на станках-автоматах, содержат повышенное количество серы (до 0,3 %), фосфора (до 0,15 %). Автоматные стали маркируют буквой А в начале марки и числом, указывающим содержание углерода в сотых долях процента. Например, А12, А20 и т.д. Литейные стали используют для фасонного литья, особенно в транспортном машино-строении. Их маркируют двузначным числом, указывающим среднее содержание углерода в сотых долях процента, и буквой Л — литая, например 15Л, 40Л.

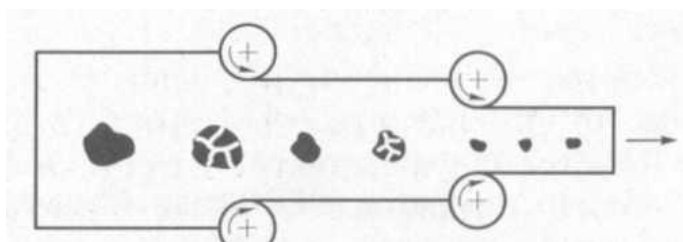


Рис. 5. Схема измельчения оксидов в процессе пластической деформации стали

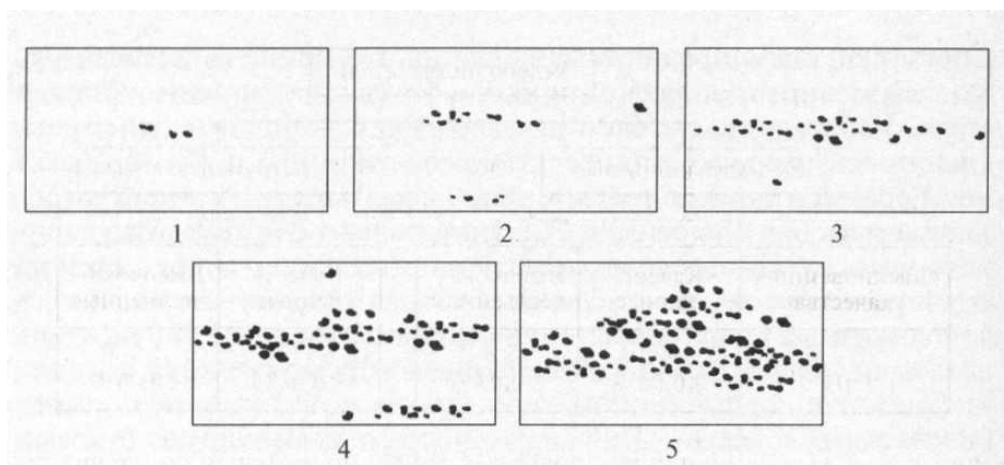


Рис. 6. Эталонная шкала неметаллических включений: 1—5 — баллы загрязненности металла неметаллическими включениями

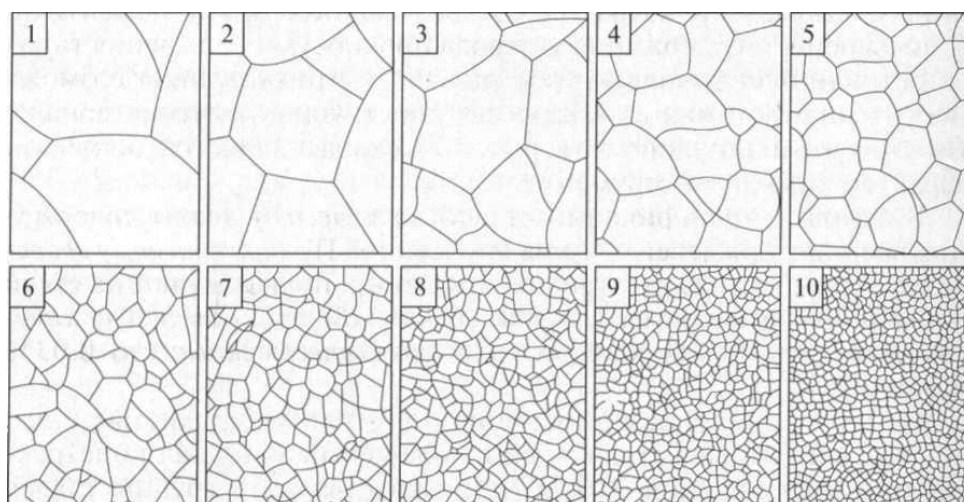


Рис. 7. Эталонная шкала зернистости стали: 1 — 10 — баллы размера зерна

Углеродистые стали, применяемые в автомобилестроении и авторемонтном производстве, можно подразделить на стали общего назначения (ГОСТ 380-88), качественные углеродистые стали (ГОСТ 1050-74) и стали специального назначения. К углеродистым специальным сталям можно отнести стали повышенной и высокой обрабатываемости резанием (ГОСТ 1414-75), углеродистые пружинно-рессорные стали (ГОСТ 14959-79), нелегированные углеродистые стали для отливок (ГОСТ 977-75) и среднеуглеродистые стали пониженной прокаливаемости, изготавливаемые по ТУ Минавтопрома.

Стали общего назначения применяются для изготовления малонагруженных автомобильных нормалей, несложных приспособлений и нестандартного оборудования в ремонтном производстве.

Углеродистые конструкционные стали повышенной и высокой обрабатываемости резанием (ГОСТ 1414—75) благодаря их высокой технологичности широко применяются при массовом производстве деталей, в частности в отечественном автомобилестроении при использовании автоматического станочного оборудования. Преимуществом специальных сталей с пониженной прокаливаемостью, разработанных на предприятиях автомобильной промышленности, является возможность обеспечения высокой поверхностной твердости деталей при сохранении вязкой сердцевины металла в результате обычной объемной закалки.

Если при изготовлении автомобильных деталей используются качественные стали с уменьшенными по отношению к ГОСТу колебаниями содержания в них углерода, после марки стали пишется слово "селект", например: "сталь 45 селект". Углеродистые качественные стали широко распространены в автомобильной промышленности для изготовления ответственных автомобильных деталей, а также в ремонтном производстве при изготовлении приспособлений и нестандартного оборудования. В табл. 3 приводятся примеры применения наиболее распространенных марок углеродистых качественных сталей. Как в автомобильной промышленности, так и в АРП возможны случаи временного отсутствия тех или иных марок сталей. В табл. 4 приведены рекомендации по замене наиболее распространенных марок сталей.

Таблица 3. Наиболее распространенные в автомобилестроении конструкционные углеродистые стали и детали, изготовленные из них

№	Марки стали	Изготавливаемые детали
1	Стали пониженной прокаливаемости	50ППО (коромысло клапана ЗИЛ-130), 58 (55ПП), 60ПП (ведомая цилиндрическая шестерня главной передачи ЗИЛ-130, ведомая коническая шестерня

		ГАЗ-53А, вторичный вал ГАЗ-53А), НИПРА (шестерни полуоси, крестовины дифференциала)
2	08, 08кп, 10	Корпуса стеклоподъемников и дверных замков, кожуха системы охлаждения, брызговики двигателя, дверки кабин, крылья, глушители, щитки радиатора, панели капота, корпуса воздушного фильтра, детали кабин и кузовов, кронштейны, крышки клапанных механизмов, регулировочные прокладки, маслоотражатели, гайки, шурупы, детали приспособлений, нестандартного оборудования
3	15, 15кп	Диски колес легковых автомобилей, различные пальцы и оси, болты и винты с круглой, олуокруглой, цилиндрической, потайной и другими головками
4	20, 20кп, 25	Валы и червяки рулевого управления, валы управления коробкой передач, карданные валы, тросы стеклоподъемников, бамперы, детали рычага ручного тормоза, вилки переключения передач, вкладыши рулевых тяг, рычаги переключения передач, различные кронштейны, тросы управления карбюратором и др.
5	30, 35	Карданные фланцы и вилки, шестерни коленчатого вала, шестерни масляного насоса, корпуса гидроцилиндров опрокидывающихся устройств самосвалов, выдвижные гильзы гидроподъемников, буксирные крюки, вилки переключения передач, шпильки колес, шестигранные резные болты, детали нестандартного оборудования
6	40, 45	Коленчатые валы двигателя и компрессора, распределительные валы, поршневые пальцы, полуоси некоторых марок легковых автомобилей, оси шестерен заднего хода, поворотные шкворни, вилки карданного вала, венцы маховиков, разжимные кулаки колодок тормоза, штанги толкателей, шпильки головки блока и др.
7	50, 60	Ведомые диски сцепления

Таблица 4. Возможные замены наиболее распространенных в автомобилестроении марок сталей

Углеродистые стали		Легированные стали	
Заменяемые марки	Марки сталей-заменителей	Заменяемые марки	Марки сталей-заменителей
Ст1	08, 10	40Г2	55Г, 60Г, 45Г2
Ст2, БСт3	10, 15, 15Г	45Г2	60Г, 65Г, 50Г2, 30Х

Ст3	20,15Г,20Г	15Г	20Г,25Г
Ст4	20,20Г,25,25Г	30Г	35Г,40Г
Ст5	30,30Г,35, 35Г, 40, 40Г	15Х	15ХА, 20Х, 12ХН3А
Ст6	45,45Г, 50, 50Г	20Х	18ХГТ, 12ХН3А,30Х
08	10	12ХН3А	20ХН3А,20ХНР, 25ХГТ, 20ХГНР
10	15	15ХМ	12Х2Н4А
15	15Г,20	18ХГТ	20ХМ
20	20Г,25	25ХГТ	30ХГТ, 20ХГР
25	25Г,30	25ХГМ	25ХГМ, 30ХГТ
30	30Г,35	35Х	25ХГТ,15ХГН2ТА
35	5Г,40	40Х	40Х
40	40Г,45	38ХА	45Х,40ХН
45	45Г, 50	40ХН	35Х, 40Х,40ХН
50	50Г, 55	30ХМА 30ХГС	45ХН 35ХМ, 38ХМ 30ХГСА, 35ХГСА

3.2 Легированные стали. Преимущества легированных сталей

Техническое применение углеродистой стали ограничивается присущими ей особенностями. Существенным недостатком углеродистой стали является ее низкая прокаливаемость. Это не позволяет реализовать потенциальные возможности стали в крупногабаритных конструкциях. При закалке массивной детали термическому упрочнению подвергается только поверхностный слой детали толщиной в половину критического диаметра, который для углеродистых сталей не превышает 25 мм. Сердцевина детали сохраняет структуру, а, следовательно, и низкие механические свойства незакаленной стали.

Не менее важное ограничение на технические возможности углеродистой стали накладывает резкое уменьшение ее пластичности и вязкости с увеличением содержания углерода. Это ограничение особенно наглядно выявляется в свойствах заэвтектоидной стали: инструмент из углеродистой стали хрупок, он не выдерживает ударных нагрузок. Приемлемую для режущего инструмента вязкость углеродистая сталь сохраняет только до содержания углерода 1,3%. При большем содержании

углерода низкий уровень пластичных свойств не позволяет использовать углеродистые стали в качестве инструментального материала.

Для устранения отмеченных недостатков в состав углеродистой стали вводят дополнительные химические элементы, т.е. ее легируют, а получаемые при этом стали называют легированными.

Наряду с устранением путем легирования присущих углеродистой стали недостатков можно также достигать нужных свойств, т.е. получать стали со специальными свойствами, например коррозионно-стойкие, жаропрочные, немагнитные и др.

Однако строго разграничить углеродистую сталь и легированную сталь достаточно сложно. В процессе выплавки в сталь неизбежно попадают разные химические элементы и из исходного сырья, и в виде технологических добавок, и из окружающей газовой среды, и в результате взаимодействия жидкого металла с футеровкой металлургических агрегатов.

В самой железной руде в некоторых количествах могут присутствовать такие элементы, как хром, никель, титан и ванадий, которые находят широкое применение в производстве легированных сталей, когда их специально вводят в сталь в качестве легирующих добавок. В некоторых рудах содержатся также медь, цинк, олово, свинец и другие элементы. Кроме того, в состав шихты вводят металлолом, содержание которого в наиболее перспективном в настоящее время конвертерном способе сталеварения достигает 30 %. Так как металлолом не разделяют по химическому составу, в любой стали, в которую не вводили специально добавок других химических элементов и которую технологи считают углеродистой, теоретически может присутствовать любой элемент Периодической системы Д. И. Менделеева.

Легированной считают сталь, в которой содержание определенных химических элементов не ниже заданных величин: не менее 0,001 % бора; 0,1 % титана, циркония, ниобия, ванадия и молибдена; 0,5 % кремния и 1,0 % всех других элементов.

По суммарному содержанию легирующих элементов различают низко- (менее 5%), средне- (5... 10%) и высоколегированные (более 10%) стали.

Наряду с положительными свойствами легированные стали обладают рядом недостатков, которые практически не свойственны углеродистым сталям.

Легированные стали подвержены следующим видам дефектов.

Дендритная ликвация формируется в процессе первичной кристаллизации как углеродистых, так и легированных сталей. Однако в процессе естественного охлаждения слитка дендритная ликвация в углеродистых сталях практически исчезает, так как соотношение компонентов стали в объеме зерна выравнивается в результате диффузии углерода. Коэффициент диффузии легирующих элементов в кристаллической решетке железа значительно ниже, чем углерода. Поэтому дендритная ликвация в легированных сталях после их охлаждения сохраняется, что снижает их свойства. Для устранения данного дефекта необходимо повысить коэффициент диффузии легирующих элементов. Это достигается в процессе диффузионного отжига, который рекомендован для устранения дендритной ликвации.

Карбидная ликвация возникает вследствие разной плотности железа и карбидов легирующих элементов, которые называют специальными карбидами. Плотность большинства специальных карбидов ниже плотности железа, поэтому они образуют в стали местные скопления. Данный дефект очень опасен, так как скопления карбидов приводят к резкому колебанию свойств легированной стали по сечению детали.

Устранить карбидную ликвацию термической обработкой легированной стали невозможно. Карбидные скопления разбивают и относительно равномерно распределяют по сечению заготовки методами обработки давлением. Данный вид дефекта наблюдается только в сталях, легированных карбидообразующими элементами, такими как титан,

цирконий, ниобий, ванадий, вольфрам, молибден, хром, марганец (приведены в порядке уменьшения карбидообразующей способности).

Практическое значение представленного ряда карбидообразующих элементов заключается в возможности прогнозировать карбидообразующее поведение вводимых в сталь легирующих элементов. Если сталь легировать несколькими карбидообразующими элементами, то следует ожидать образования карбида только того химического элемента, который находится в ряду карбидообразующих элементов левее.

Общими дефектами легированных сталей с повышенным содержанием хрома являются *отпускная хрупкость II рода и флокены*.

Отпускная хрупкость II рода проявляется в легированных сталях при медленном охлаждении в области температур около 550 °С. Отпускную хрупкость II рода называют обратимой.

Предупредить отпускную хрупкость II рода быстрым охлаждением стальной детали в рабочих условиях действующей тепло-вой машины не всегда возможно. Уменьшить содержание фосфора до уровня менее 0,001 %, необходимого для предупреждения отпускной хрупкости, для сталей массового применения также не представляется возможным, учитывая, что допустимое содержание фосфора даже в особовысококачественных сталях удается обеспечить на уровне 0,025 %. Наиболее реальным и широко практикуемым способом предупреждения отпускной хрупкости II рода является введение в сталь молибдена в количестве около 0,5 %. Образующиеся им карбиды препятствуют диффузии фосфора к границам зерен и предупреждают появление отпускной хрупкости.

Флокенами (от нем. *floske* — хлопья) называют трещины в металле. На травленной поверхности шлифа они имеют вид мелких трещин, а в изломе выглядят, как белые хлопьевидные пятна.

Флокены возникают в процессе быстрого охлаждения пластически деформированных хромистых сталей в интервале температур 200...20°С. Причиной образования флокенов является содержащийся в металле водород,

который при высокой скорости охлаждения не успевает продиффундировать к поверхности слитка и, выделяясь в толще металла, образует поры. Флокены редко образуются в литой стали, так как литой металл рыхлый и пористый, что облегчает удаление водорода из стали. Флокены практически не встречаются в деталях сечением меньше 25 мм.

Наличие флокенов резко ухудшает свойства стали и делает ее непригодной для конструкционного применения.

Предупредить образование флокенов можно путем уменьшения скорости охлаждения ниже 200°C , т.е. созданием условий для удаления водорода из стали путем диффузии. При вакуумной плавке или вакуумной разливке стали водород удаляется из расплава, что также предупреждает формирование флокенов. Устранить образовавшиеся флокены в некоторых случаях позволяет последующая пластическая деформация, в процессе которой возможно заваривание трещин. Флокены устраняются ковкой или прокаткой на меньший размер заготовки.

Шиферный излом наблюдается только после горячей деформации и вызывается неравномерным распределением соединений серы, фосфора, кислорода и других примесей. Усадочные раковины и газовые пузыри при прокатке вытягиваются, образуя слои загрязненного металла. При разрушении по такому слою излом получается слоистым, с острыми зазубринами и выступами. Термической обработкой шиферный излом не исправляется. Полностью устранить его иногда удается только перековкой стали. Сталь с таким дефектом чаще направляют в переплав.

Взаимодействие легирующих элементов с компонентами стали. Основными компонентами стали являются железо и углерод. Большинство легирующих элементов с железом образуют твердые растворы замещения. Исключением является бор, который образует с железом твердый раствор внедрения. Многие легирующие элементы, растворяющиеся в железе, образуют также химические соединения с углеродом — специальные карбиды. Кроме того, легирующие элементы могут образовывать и другие

химические соединения: с кислородом — оксиды, с азотом — нитриды. Некоторые легирующие элементы не взаимодействуют с компонентами стали и находятся в свободном состоянии, образуя самостоятельную фазу. К таким элементам относятся серебро и свинец. Медь приблизительно до 1 % растворяется в железе, а при большем содержании находится в свободном состоянии в виде отдельной фазы. Химические соединения легирующих элементов с углеродом и другими элементами стали также присутствуют в виде отдельной фазы. Химические соединения легирующих элементов с железом и между собой называют интерметаллидами.

Растворяясь в α -железе, легирующие элементы оказывают значительное влияние на свойства стали, поскольку феррит, который является твердым раствором углерода в α -железе, занимает до 90 % в структуре сталей.

Внедрение в кристаллическую решетку феррита атомов других элементов, например, бора, искажает его кристаллическую решетку. Образование твердого раствора замещения также создает напряжения в кристаллической решетке феррита, так как размеры атомов железа и легирующего элемента различаются. Если атомный радиус легирующего элемента меньше, чем у железа, то параметр кристаллической решетки феррита уменьшается, тогда как элементы с большим атомным радиусом увеличивают период решетки железа. Искривление кристаллической решетки α -железа вызывает соответствующее изменение свойств феррита. Большинство химических элементов, используемых в качестве легирующих, повышает прочность и снижает пластичность стали.

Однако, повышая твердость и прочность феррита, легирующие элементы (за исключением никеля) снижают его пластичность и ударную вязкость.

Наиболее широко для легирования сталей используют марганец, кремний, хром, никель, вольфрам, молибден, ванадий, ниобий, титан и бор.

Марганец, в небольших количествах содержащийся во всех сталях — как углеродистых, так и легированных, используется в качестве

технологической добавки для раскисления стали и устранения вредного действия серы — краснеломкости. В железе марганец растворяется в любых соотношениях, образуя твердый раствор. Легирующим элементом марганец считается при содержании в стали более 1 %. По сравнению с другими легирующими элементами он наиболее значительно повышает прокаливаемость стали. Также марганец значительно повышает твердость стали, но при содержании его свыше 1,5 % сталь резко теряет пластичность, поэтому это содержание марганца в стали в большинстве случаев является предельным. Однако при его содержании около 13%, что является исключением из общего правила, сталь приобретает высокую износостойкость.

Введение марганца приводит к сильному росту зерен аустенита при перегреве стали. Поэтому обычно вместе с марганцем в сталь вводят карбидообразующие элементы, которые способствуют измельчению зерна.

Кремний — один из самых распространенных в природе элементов. Это легкоокисляющийся элемент, обычно он находится в виде оксидов и его восстановление из окисленной формы требует значительных затрат энергии. В производстве стали кремний применяется в качестве раскислителя. При содержании в стали выше 0,5 % кремний считается легирующим элементом. В железе кремний растворяется в любых соотношениях. Его влияние на прочность и пластичность стали аналогично действию марганца. Содержание его в легированных сталях ограничивают пределом 2 %, превышение которого приводит к резкому снижению пластичности стали.

Хром растворяется в цементите и образует с углеродом карбиды, поэтому его широко используют для легирования сталей конструкционного назначения. Заметно упрочняя сталь, хром мало влияет на ее пластичность, существенно увеличивает прокаливаемость стали. Благодаря образованию карбидов повышает износостойкость стали. При содержании более 13 % придает стали коррозионную стойкость.

Никель — один из наиболее ценных, но дефицитных легирующих элементов. Никель оказывает наиболее благоприятное влияние на свойства стали: повышает прочность, практически не уменьшая ее пластичности. В сталь никель вводят в количестве до 10 %.

Вольфрам и молибден — самые дорогие и остродефицитные, легирующие элементы. В сталь их вводят в незначительных количествах: обычно в десятых долях процента. Как вольфрам, так и молибден сильно повышают прокаливаемость стали и, являясь сильными карбидообразователями, измельчают зерно. Их введение устраняет отпускную хрупкость II рода, присущую хромсодержащим легированным сталям.

Ванадий, ниобий, титан — сильные карбидообразователи. Их вводят для измельчения зерна в количестве не более 0,3 %, так как при большем содержании они снижают прокаливаемость стали и приводят к ее охрупчиванию.

Бор вводят в микродозах до 0,005 % с целью повышения прокаливаемости стали. Этот элемент является наиболее эффективной добавкой для увеличения прокаливаемости. Такой же эффект может быть достигнут при введении 0,2 % молибдена или 1 % никеля.

Особенности термической обработки. Термическая обработка легированных сталей имеет свои особенности, отличающие ее от термической обработки углеродистых сталей.

Критические точки. Вследствие более низкого, чем у углерода, коэффициента диффузии легирующих элементов в кристаллической решетке железа все процессы вторичной кристаллизации в легированных сталях происходят с меньшей скоростью, чем у углеродистых сталей. Для выравнивания скоростей вторичной кристаллизации легированных сталей необходимо сблизить коэффициенты диффузии легирующих элементов и углерода. Это достигается повышением температуры обработки легированной стали. Значения температур критических точек A_1 , A_3 и A_{cm}

для легированных сталей на 30...50°C выше соответствующих температур для углеродистых сталей при одинаковом с ними содержании углерода.

Скорости нагрева и охлаждения. Все легированные стали менее теплопроводны по сравнению с углеродистыми сталями. Поэтому нагревать и охлаждать легированные стали следует с меньшей скоростью, чем углеродистые стали. В противном случае в легированных сталях из-за неравномерного прогрева по сечению детали могут возникнуть внутренние напряжения. Если их величина превысит прочностные характеристики стали, то деталь подвергнется необратимому формоизменению: она может деформироваться или произойдет трещинообразование.

В процессе охлаждения при закалке легированной стали на термические напряжения, возникающие вследствие ее низкой теплопроводности, накладываются напряжения из-за изменения объема стали в результате образования мартенсита закалки. Поэтому для более плавного охлаждения легированной стали в процессе закалки используют не воду, а другие среды с меньшей охлаждающей способностью, т.е. с меньшей теплоемкостью, например, масло. Некоторые марки легированных сталей закаляются при охлаждении на воздухе. Введение легирующих элементов уменьшает критическую скорость закалки стали. Использование в качестве охлаждающих сред при закалке легированных сталей масла или воздуха обусловлено именно тем, что критическая скорость их закалки меньше скорости охлаждения стали в этих средах.

Влияние легирующих элементов на диаграмму изотермического превращения аустенита. Растворяясь в железе, легирующие элементы приводят к тому, что диаграмма изотермического превращения аустенита видоизменяется. Область перлитного превращения смещается вправо. Следовательно, критическая скорость закалки легированной стали, которую определяют как касательную к кривой начала перлитного превращения аустенита, уменьшается. Значения критических точек M_n и M_k под влиянием добавок легирующих элементов уменьшаются. Исключением является

кобальт, введение которого в сталь не сказывается на положении Мн и Мк. Снижение критических точек Мн и Мк приводит к тому, что содержание остаточного аустенита в закаленной легированной стали больше, чем в углеродистой стали равного содержания углерода.

Влияние легирующих элементов на отпуск. Изменение твердости закаленной легированной стали в процессе отпуска при температуре приблизительно до 350°C подчиняется тем же закономерностям, которые имеют место в случае отпуска углеродистых сталей. До 200°C твердость как углеродистых, так и легированных сталей изменяется незначительно, так как сталь сохраняет однофазную структуру: мартенсит закалки постепенно превращается в мартенсит отпуска. При более высоких температурах отпуска сталь приобретает двухфазную структуру, состоящую из феррита и цементита, который имеет зернистую форму. Эти двухфазные структуры классифицируют по величине зерен цементита: мелкозернистая структура называется троститом отпуска, а крупнозернистая — сорбитом отпуска. Появление в структуре мягкого феррита приводит к резкому падению твердости как углеродистой, так и легированной стали.

В отличие от продолжающегося падения твердости углеродистой стали при температуре отпуска свыше 350°C твердость стали, легированной карбидообразующими элементами, начинает возрастать. При температуре около 550°C твердость легированной стали достигает максимального значения, в ряде случаев превосходя твердость закаленной стали до отпуска. При дальнейшем повышении температуры отпуска твердость легированной стали вновь начинает уменьшаться.

Повышение твердости легированной стали в результате высокого отпуска называют вторичной твердостью.

Восходящую ветвь кривой вторичной твердости объясняют образованием дисперсных, т.е. очень мелких включений карбидов легирующих элементов — специальных карбидов (спецкарбидов). Имея размеры, сопоставимые с размерами дислокаций, частицы спецкарбидов

тормозят продвижение дислокаций под воздействием внешнего усилия, т.е. упрочняют сталь. При температурах около 550 °С спецкарбиды начинают укрупняться путем слияния включений. Процесс укрупнения карбидов легирующих элементов называют коагуляцией. Относительно крупные включения карбидов не являются препятствием на пути перемещения дислокаций под воздействием внешней нагрузки: дислокации их просто огибают, не тормозя своего движения, вследствие чего при температурах отпуска выше 550°С сталь разупрочняется. Одним из проявлений процесса разупрочнения стали является падение ее твердости.

Маркировка. Легированные стали маркируют сочетанием цифр и букв, обозначающих химические элементы в составе стали. Цифры, расположенные перед буквенной частью маркировки, показывают содержание углерода в стали. Первые две цифры показывают содержание углерода в сотых долях процента, однозначное число — в десятых долях процента. При содержании углерода около 1 % цифру перед буквенными обозначениями опускают.

Содержание углерода в легированной стали, как и в случае углеродистой стали, характеризует ее назначение (инструментальная сталь или конструкционная).

Обратим внимание, что по числу цифр или по их отсутствию перед буквенной частью маркировки можно определить назначение легированной стали. Однозначное число и его отсутствие указывает, что данная марка стали рекомендуется для изготовления инструмента. Неоднозначные числа в начале маркировки показывают, что сталь имеет конструкционное назначение.

Для маркировки используют обозначение введенных в состав стали легирующих элементов буквами русского алфавита: Н — никель; Х — хром; К — кобальт; М — молибден; Г — марганец; Д — медь; Р — бор; Б —

ниобий; Ц — цирконий; С — кремний; П — фосфор; Ч — редкоземельные металлы; В — вольфрам; Т — титан; Ф — ванадий; Ю — алюминий.

Первые цифры в маркировке сталей указывают среднее содержание углерода: в сотых долях процента в конструкционных сталях; в десятых долях процента в инструментальных сталях.

Цифры, стоящие после буквы, указывают содержание данного химического элемента в процентах. Отсутствие цифры после буквы означает, что содержание данного элемента в стали около 1 %. Исключения составляют те химические элементы, содержание которых в стали, при отсутствии стоящих за буквенными обозначениями элемента цифр, составляет соответственно десятые (титан Т, цирконий Ц, ниобий Б, ванадий Ф, молибден М) и тысячные (бор Р) доли процента.

Маркировка сложнолегированных сталей несколько отличается от маркировки легированных сталей конструкционного и инструментального назначения.

Например, шарикоподшипниковые стали обозначают буквой Ш, быстрорежущие — буквой Р (от англ. rapid — быстрый), автоматные — буквой А, которые ставят в начале буквенной части маркировки.

Легированные стали обыкновенного качества не выпускают. Высококачественные и особовысококачественные легированные стали обозначают соответственно буквами А и Ш в конце маркировки. Буква А, находящаяся в начале маркировки, обозначает автоматную сталь.

Особовысококачественные стали (содержание вредных примесей — менее 0,015 % серы и менее 0,025 % фосфора) получают в процессе электрошлакового переплава стали, что нашло отражение в маркировке сталей этой группы в виде буквы Ш, после дефиса в конце марки. Остальные легированные стали относятся к группе качественных сталей.

При описании легированных сталей вместо текстового названия химических элементов используют их символы, которые приведены в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева. На примере

маркировки ряда легированных сталей рассмотрим, какую информацию она содержит.

12X18H9T — 0,12% C, т.е. сталь имеет конструктивное значение; 18 % Cr; 9 % Ni; 0,1 % Ti; сталь качественная, т.е. содержание S и P не более 0,04 % каждого;

9XC — 0,9% C, т.е. сталь инструментальная; 1 % Cr; 1 % Si; сталь качественная, т.е. S и P < 0,04% каждого;

XBG — 1 % C, т.е. сталь инструментальная; 1 % Cr; 1 % W; 1 % Mn; сталь качественная, т.е. S и P < 0,04 % каждого;

38X2MЮА — 0,38 % C, т.е. сталь конструкционная; 2 % Cr; 0,1 % Mo; 1 % Al; сталь высококачественная, т.е. S и P < 0,03 % каждого;

08X13-Ш — 0,08 % C, т.е. сталь конструкционная; 13 % Cr; сталь особовысококачественная, т.е. S и P < 0,025 % каждого;

ШХ15 — 1 % C, шарикоподшипниковая сталь; 1,5% Cr; сталь качественная, т.е. S и P < 0,04 % каждого. Обратите внимание, что содержание хрома в марке ШХ15 не 15 %, как было бы при отсутствии буквы Ш в начале маркировки, а 1,5 %;

P18 — 1 % углерода, быстрорежущая сталь, 18 % W; сталь качественная, т.е. S и P < 0,04% каждого. Обратите внимание, что наличие вольфрама в маркировке не отражено буквенным обозначением. В быстрорежущей стали первые цифры всегда обозначают содержание вольфрама.

Экспериментальные марки сталей до накопления данных, необходимых для их включения в ГОСТ, маркируют сочетанием букв ЭИ или ЭП и цифр, означающих порядковый номер марки стали. Первая буква обозначает завод, выпускающий данную марку стали, вторая — характеризует уровень отработанности технологии производства данной марки: исследовательская или пробная. Информация о химическом составе стали в маркировке отсутствует. Например, ЭИ415 — исследовательская марка стали, выпускаемая заводом ОАО «Электросталь», порядковый номер марки 415.

Классификация. Легированные стали по структуре делят на пять классов: перлитный, ферритный, аустенитный, ледебуритный и мартенситный.

3.3 Стали перлитного класса

В равновесном состоянии, которое достигается путем отжига с последующим медленным охлаждением, структура низколегированных сталей соответствует диаграмме состояния железо — углерод. В зависимости от содержания углерода различают низколегированные доэвтектоидные стали со структурой $\Phi + \Pi$ (на рис.8,а показан левый нижний угол диаграммы состояния железо — углерод), эвтектоидные, имеющие структуру Π [$\Phi + \Pi$], и заэвтектоидные со структурой $\Pi + \Pi\Pi$. Вследствие наличия перлита в структуре этих сталей при любом содержании углерода их относят к перлитному классу. Стали перлитного класса (или перлитные стали) содержат до 5 % легирующих элементов. Как наиболее дешевые они широко применяются в технике в качестве материалов конструкционного и инструментального назначения. Например, конструкционную сталь 10ХСНД широко применяют в судостроении и мостостроении, а также для изготовления несущих конструкций других инженерных сооружений, испытывающих переменные динамические нагрузки в условиях суточных и сезонных теплосмен. Из инструментальных сталей отметим сталь ХВСГ, которую широко используют для изготовления длинномерного режущего инструмента большого поперечного сечения.

3.4 Стали ферритного класса.

Под влиянием определенных легирующих элементов диаграмма состояния железо — углерод видоизменяется. Введение в состав стали таких легирующих элементов, как Cr, Mo, W, V, Si, Ti и др., в количестве выше определенного значения приводит к расширению однофазной области [Φ] (рис.8,б). Данные легирующие элементы называют элементами,

расширяющими область твердого раствора углерода в Fe α (расширяющими ферритную область). Стали, легированные этими элементами в концентрации выше предельного значения X, называют сталями ферритного класса, или ферритными сталями.

Примером является сталь 08X13 — наиболее дешевая коррозионно-стойкая сталь, которую применяют для изготовления лопаток паровых турбин.

3.5 Стали аустенитного класса

Введением в состав стали легирующих компонентов Ni или Mn достигается расширение однофазной области [A] (рис.8, в). Эти легирующие элементы называют элементами, расширяющими область Fe γ , или область аустенитной фазы [A], так как твердый раствор углерода в γ -железе — это аустенит. При содержании данных легирующих элементов выше предельного значения Y легированные Ni и/или Mn стали относятся к сталям аустенитного класса и называются аустенитными. Примером может быть конструкционная сталь 12X18H10T, которую широко применяют для изготовления технологического оборудования химической, пищевой и других отраслей промышленности.

Аустенитные стали обладают всеми свойствами аустенита. Одной из особенностей аустенита является отсутствие у него магнитных свойств, он немагнитен. Стали аустенитного класса также немагнитны. Но в отличие от аустенита, который в углеродистых сталях существует только при температурах выше температуры критической точки Ac1 легированные стали аустенитного класса немагнитны и при нормальных температурах, так как содержат аустенит в структуре и при низких температурах.

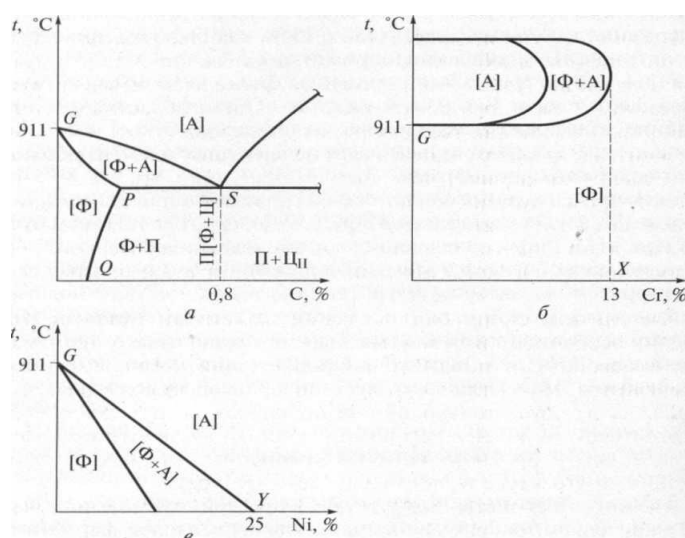


Рис.8. Влияние легирующих элементов на полиморфное превращение железа с образованием легированных сталей перлитного (а), ферритного (б) и аустенитного (в) классов (показаны соответствующие области диаграммы состояния железо — углерод): G, S, P, Q — стандартные точки диаграммы состояния железо—углерод; [A], [Ф], [Ф + А] — однофазные области аустенита (Fe γ), феррита (Fe α) и двухфазная область со структурой Ф + А (феррит Fe α и аустенит Fe γ); П[Ф + Ц] — перлит (эвтектоидная смесь феррита и цементита); Ф + П, П + ЦII — структурные составляющие доэвтектоидной и заэвтектоидной стали; X, Y — предельная концентрация легирующих элементов в стали ферритного и аустенитного класса соответственно.

Магнитные свойства могут служить простейшим диагностическим критерием для разделения легированных сталей ферритного и аустенитного классов: ферритные стали притягиваются магнитом, а аустенитные стали не притягиваются.

Особенностью высокотемпературного поведения сталей ферритного и аустенитного классов при содержании в них соответствующих легирующих элементов выше предельных значений X и Y соответственно является отсутствие полиморфного превращения Fe $\alpha \leftrightarrow \text{Fe}\gamma$. Это означает, что такие стали в отличие от углеродистых в процессе термической обработки не могут образовывать пересыщенный твердый раствор углерода в Fe α , т.е. не поддаются закалке с целью получить в структуре мартенсит закалки и соответствующее повышение твердости. Тем не менее стали ферритного и

аустенитного классов подвергают термической обработке в виде нагрева до температур 1050...1200°C и быстрого охлаждения в воде, масле или на воздухе. Такая термическая обработка сталей ферритного и аустенитного классов также носит название закалки, но в отличие от термической обработки углеродистых сталей в данном случае упрочнения стали добиваются выделением мелкодисперсных включений.

Высокотемпературный нагрев этих сталей проводят с целью максимального растворения легирующих элементов в феррите или аустените, а при быстром охлаждении образовавшуюся структуру успевают зафиксировать. Отпуск или старение в таком случае проводят путем повторного нагрева быстро охлажденной стали до температур 600...800°C с последующей длительной выдержкой при конечной температуре повторного нагрева с целью приблизить структуру стали к равновесному состоянию, что сопровождается выделением дисперсных включений упрочняющей фазы.

3.6 Стали ледебуритного класса

В железоуглеродистых сплавах ледебурит является характерной структурной составляющей белых чугунов. Однако под влиянием добавок некоторых легирующих элементов, таких как вольфрам W и другие карбидообразующие элементы, диаграмма состояния железо — углерод деформируется: точки E и S смещаются влево (рис.9) и, таким образом, ледебурит, присутствующий в железоуглеродистых сплавах только в структуре чугунов, появляется в структуре легиро-ванной стали. К сталям ледебуритного класса относятся быстрорежущие стали, например, сталь P18.

Обычно в структуре превращенного ледебурита при нормальной температуре присутствует цементит ($L^*(P + C)$). Цементит входит также и в состав перлита $P [F + C]$. Цементит обладает высокой твердостью, но весьма хрупок. Низкая пластичность ледебурита является основным препятствием для применения белых чугунов в технике.

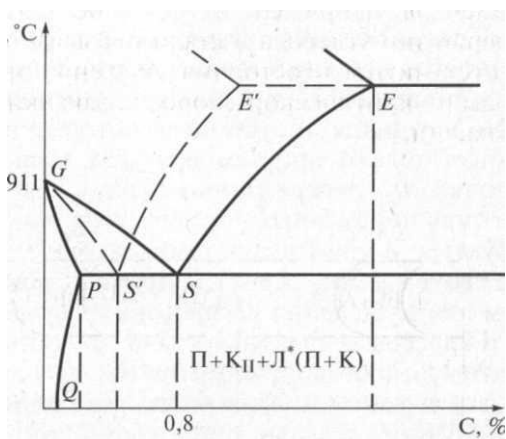


Рис. 9. Влияние легирующих элементов на диаграмму состояния железо—углерод при образовании легированных сталей ледобуритного класса (показана соответствующая область диаграммы): G, S, E, P, Q — стандартные точки диаграммы; S', E' — смещенные положения точек S и E в результате легирования вольфрамом и другими карбидообразующими элементами; П, КII, Л* (П + К) — перлит, вторичные спецкарбиды и ледобурит превращенный, в составе которого также спецкарбиды

В сталях ледобуритного класса структура ледобурита видоизменяется. Вследствие наличия в стали карбидообразующих элементов вместо цементита в составе как превращенного ледобурита, так и перлита образуются спецкарбиды, т. е. структурной составляющей сталей ледобуритного класса является Л*(П + К), содержащий спецкарбиды. Поэтому в отличие от ковкого чугуна легированные стали ледобуритного класса могут подвергаться обработке давлением. Так,ковка слитка ледобуритной стали является обязательной технологической операцией в процессе изготовления из нее инструмента.

3.7 Стали мартенситного класса

Данные стали являются модификацией легированных сталей ферритного класса. Повышение содержания углерода расширяет аустенитную область на диаграмме состояния сталей ферритного класса. При равном содержании легирующих элементов, например 13% Cr (рис.10), при соответствующем содержании углерода в стали оказывается возможным нагреть ее до аустенитного состояния. Аустенит при охлаждении со скоростью выше критической скорости закалки превращается в мартенсит закалки.

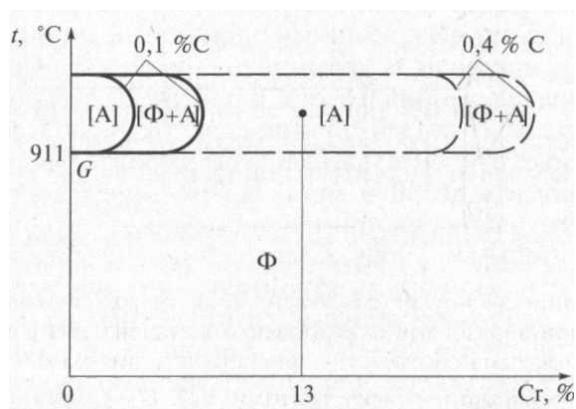


Рис. 10. Границы аустенитной области в легированных хромом сталях мартенситного класса в зависимости от содержания углерода

3.8 Стали конструкционного назначения

В зависимости от областей применения легированных конструкционных сталей различают строительные и машиностроительные стали.

Строительные стали. Для изготовления несущих конструкций промышленных зданий и сооружений, периодического профиля, для армирования железобетонных конструкций, для изготовления сварных труб большого диаметра, предназначенных для магистральных нефте- и газопроводов, для создания тяжело нагруженных сварных конструкций, для строительства мостов и других сооружений используют строительные стали.

Детали строительных конструкций соединяют преимущественно термической сваркой, поэтому основным требованием к строительным сталям является их хорошая свариваемость. Это требование обеспечивается низким содержанием углерода в стали. Низколегированные строительные стали содержат до 0,25 % углерода.

Для целостности и прочности сварного соединения, прежде всего, опасны трещины, которые могут возникнуть при сварке.

Не менее важны требования к строительным сталям, связанные с экономическими показателями — строительная сталь должна быть дешевой. Данное требование приобретает очень большое значение в связи с постоянно

растущими производством и потреблением строительных сталей. Оно обеспечивается введением недефицитных легирующих элементов в суммарном количестве до 3 %. Основными легирующими элементами строительных сталей являются марганец и кремний, с микродобавками ванадия, ниобия, титана, алюминия и азота. В результате легирования прочность строительных сталей повышается, т.е. использование низколегированных относительно дешевых строительных сталей позволяет экономить до 30 % металла, что определяет в большой степени преимущества их применения. Кроме того, низколегированные строительные стали обладают низким значением порога хладноломкости. Например, строительная сталь марки 10ХСНД обеспечивает работоспособность изготовленных из нее конструкций при температуре до -60 °С. Данная сталь обладает также атмосферостойкостью, т.е. она может эксплуатироваться в атмосферных условиях без защитного окрашивания. Наличие в стали малых добавок кремния, никеля и меди модифицирует образующуюся на ее поверхности ржавчину. Модифицированная ржавчина имеет хорошую адгезию с поверхностью стали и достаточно высокую плотность, чтобы предотвратить дальнейшее проникновение химически активных компонентов воздушной среды (кислорода и паров воды) в толщу металла. Модифицирование ржавчины развивается постепенно в течение нескольких (до трех) лет, после этого срока процесс коррозии (ржавления) стальной конструкции приостанавливается.

Строительные стали обладают высокой пластичностью, т.е. могут обрабатываться давлением и резанием.

Высокие технологические и прочностные свойства низколегированных строительных сталей достигаются в результате дисперсионного упрочнения карбонитридами легирующих элементов. Дисперсионное упрочнение проводится на стадии производства металлопродукции.

Достоинства легированных сталей наиболее полно проявляются после их термической обработки. Строительные стали подвергают нормализации или закалке с последующим низким отпуском.

Машиностроительные стали. Машиностроительные стали применяют преимущественно для изготовления деталей машин и технологического оборудования ответственного назначения.

В зависимости от вида упрочняющей термической обработки конструкционные стали делят на две группы: цементуемые и улучшаемые.

Цементуемые стали — это низкоуглеродистые стали с содержанием углерода до 0,25 %. К этой группе относятся углеродистые, а также низко- и среднелегированные стали.

Цементуемые стали предназначены для изготовления деталей, работающих в условиях интенсивного изнашивания рабочей поверхности в результате ее взаимодействия с контактирующей деталью, т.е. испытывающих высокие динамические и статические нагрузки.

Для повышения износостойкости поверхностного слоя детали ее подвергают насыщению углеродом с последующими закалкой и низким отпуском. Наиболее распространенным способом для выполнения данной технологической операции является цементация, что и послужило основанием для названия сталей этой группы цементуемыми.

Высокие механические свойства сердцевины детали могут быть обеспечены только в процессе термической обработки. Поэтому для цементуемых сталей прокаливаемость определяет возможность использовать ее для изготовления деталей ответственного назначения.

Для деталей простой формы и небольших размеров используют углеродистые стали. Детали больших сечений изготавливают из легированных сталей, причем, чем больше размер детали, тем более легированную сталь следует назначать для обеспечения более высокой прокаливаемости.

Хромистые стали типа 20Х наиболее дешевые из сталей данной группы. Прокаливаемость их невелика, поэтому хромистые стали применяют

для изготовления мелких деталей сечением до 25 мм, испытывающих в процессе эксплуатации средние нагрузки.

Отметим, что одинаковое с углеродистыми сталями значение критического диаметра (25 мм) получено в данном случае при охлаждении в масле, а не в воде, как принято для углеродистых сталей. Это дает заниженные результаты. Использование масла в качестве охлаждающей среды при закалке хромистых сталей позволяет применять их для изготовления мелких деталей более сложной конфигурации, чем при использовании углеродистых сталей.

Хромоникелевые стали, например 12ХНЗА, применяют для изготовления крупных деталей сечением до 100 мм. Однако легирование никелем повышает стоимость стали, поэтому хромоникелевые стали рекомендуют только для деталей ответственного назначения. Для снижения стоимости стали никель в ряде случаев заменяют более дешевым марганцем.

Хромомарганцевые стали, например 18ХГТ и 25ХГТ, нашли широкое применение в отраслях массового машиностроения, таких как автомобилестроение, станкостроение для изготовления зубчатых колес и шестерен.

Улучшаемые стали содержат 0,3...0,5 % углерода и разное количество легирующих элементов. После отжига структура их состоит из феррита и перлита, содержание которого тем выше, чем больше углерода и легирующих элементов в стали. Из названия сталей следует, что они подвергаются термической обработке улучшением, которая состоит из закалки и высокого отпуска.

После улучшения стали приобретают структуру сорбита отпуска, который хорошо воспринимает ударные нагрузки. Поэтому улучшаемые стали рекомендуют использовать для изготовления деталей, работающих в условиях динамических нагрузок. Кроме того, они имеют низкий порог хладноломкости и могут быть рекомендованы для изготовления машин в северном исполнении.

Стали для деталей выбирают по прокаливаемости, так как механические свойства сталей разных марок после улучшения в случае сквозной прокаливаемости практически одинаковы. Чем больше в стали легирующих элементов, тем больше прокаливаемость и, следовательно, чем больше сечение детали, тем более легированную сталь нужно выбирать.

Углеродистые улучшаемые стали характеризуются небольшим критическим диаметром при закалке, поэтому их применяют для деталей небольших сечений, работающих при невысоких нагрузках.

Хромистые стали типа 40Х получили широкое применение. При закалке в масле они прокаливаются в сечении до 30 мм. Хромистые стали применяют для машиностроительных деталей небольших сечений.

Хромоникелевые стали, например 40ХН, обеспечивают высокий уровень механических свойств в деталях сечением до 70 мм. В сочетании с хромом никель обеспечивает высокую прокаливаемость стали и хорошую ее закаливаемость. Такие стали применяют для высоконагруженных деталей, испытывающих ударные и знакопеременные нагрузки, например, для изготовления коленчатых валов. Основным недостатком хромоникелевых сталей — их высокая стоимость.

Хромансилы — это стали, которые наряду с хромом легированы более дешевыми легирующими элементами — марганцем и кремнием, как например, сталь 35ХГСА. Хромансилы сочетают высокие механические свойства и хорошие технологические свойства с экономической конкурентоспособностью, заменяют более дорогие хромоникелевые стали в деталях малого сечения. Они хорошо свариваются, обрабатываются давлением и резанием. Хромансилы применяют в автомобилестроении для изготовления ответственных деталей сечением до 40 мм (валы, детали рулевого управления) и в самолетостроении в виде листов и труб для сварных конструкций.

Основным недостатком сталей, легированных хромом, является их склонность к отпускной хрупкости II рода, поэтому практикуемое обычно

для относительно мелких деталей быстрое охлаждение в случае крупногабаритных деталей неприменимо. Для радикального устранения отпускной хрупкости II рода данные стали легируют молибденом и только такие стали используют для ответственных крупногабаритных деталей сечением до и более 100 мм. Примером является сталь 40ХН2МА.

Если рабочими условиями эксплуатации детали из улучшаемой легированной стали предусмотрен фрикционный износ рабочей поверхности, то ее подвергают азотированию. Сталь 38Х2МЮА специально разработана для осуществления процесса азотирования.

3.9 Стали с особыми свойствами

Большинство рассмотренных конструкционных легированных сталей являются универсальными. Достоинства этих сталей позволяют использовать их для изготовления деталей и конструкций самого разнообразного назначения.

Наряду с конструкционными сталями универсального применения созданы также конструкционные стали с определенными функциональными свойствами, которые определяют область их рационального применения, как, например, коррозионностойкие, жаропрочные, износостойкие и обладающие другими специфическими свойствами стали. Их относят к сталям с особыми свойствами.

Рессорно-пружинные стали. Данные стали должны обладать свойствами, обеспечивающими работу упругих элементов машин, которые предназначены для смягчения толчков и ударов по функциональным деталям машин и оборудования.

Для обеспечения работоспособности упругих элементов сталь должна иметь высокие значения предела упругости, остаточная деформация для такой стали не допускается. Поскольку упругие элементы подвержены многократным нагрузкам, сталь должна обладать также высоким пределом

выносливости. Кроме того, сталь должна иметь высокую прокаливаемость, чтобы получить требуемую структуру и соответствующие свойства по всему сечению упругого элемента.

Для изготовления рессор и пружин используют стали с содержанием углерода в интервале 0,5...0,7%. Высокие упругие свойства достигаются в результате закалки с последующим средним отпуском. Образующаяся при среднем отпуске структура — трос-тит отпуска — обеспечивает высокое значение модуля упругости стали.

Углеродистые стали применяют для изготовления пружин и рессор небольшого сечения. Для повышения прокаливаемости стали легируют. Поскольку упругие элементы широко применяются в машиностроении, для легирования используют дешевые элементы: марганец и кремний. Для изготовления пружин ответственного назначения стали легируют хромом, никелем и ванадием.

На качество и работоспособность пружин большое влияние оказывает состояние поверхности. При наличии трещин и других дефектов на поверхности пружины срок ее службы уменьшается. Разрушение происходит вследствие развития усталостных трещин в местах концентрации напряжений вокруг этих дефектов.

Рабочий ресурс упругих элементов можно значительно увеличить путем их дробеструйной обработки, приводящей к наклепу поверхностного слоя. В результате наклепа предел выносливости может увеличиться вдвое.

Для изготовления автомобильных рессор широко применяют сталь 50ХГА. Завершающей технологической операцией изготовления рессор является дробеструйная обработка.

Иногда для исполнения пружин применяют шлифованную холодноотянутую проволоку, которую называют серебрянкой. Серебрянку изготавливают из углеродистых сталей. Наклеп при холодном прокате вызывает повышение прочности и упругости стали.

Подшипниковые стали. Для изготовления шариков, роликов, колец подшипников качения и других деталей (плунжеров, втулок, нагнетательных клапанов и др.) используются подшипниковые стали, которые должны обладать высокой твердостью, износостойкостью и высоким пределом выносливости, так как в процессе эксплуатации они воспринимают значительные знакопеременные нагрузки (примером могут быть детали подшипника). По-этому в подшипниковых сталях недопустимы наличие неметаллических включений, неравномерное распределение карбидов, наличие газовых пузырей и пор. Эти дефекты являются концентраторами напряжений, вызывающими образование трещин и выкрашивание металла, что приводит к преждевременному выходу подшипника из строя.

В рабочем состоянии подшипников качения элементы качения — шарики или ролики — движутся по наружному и внутреннему кольцам подшипника. Стали для изготовления колец, роликов и шариков имеют конструкционное назначение, однако по составу, структуре и свойствам относятся к инструментальным сталям.

Получившая наибольшее применение как подшипниковая высокоуглеродистая сталь марки ШХ15 является заэвтектоидной сталью, легированной хромом. Большое содержание углерода (1 %) и наличие хрома (1,5%) обеспечивают после термической обработки высокую твердость стали. Ее применяют для деталей небольших сечений.

Для повышения прокаливаемости сталь дополнительно легируют. Учитывая массовое производство подшипников, используют дешевые легирующие элементы: марганец и кремний. Это позволяет применять ее для изготовления более крупных деталей, чем при использовании высокоуглеродистой стали.

Термическая обработка сталей заключается в закалке с последующим низким отпуском. Особенностью термической обработки заэвтектоидных сталей является наличие в структуре закаленной стали остаточного аустенита. Превращение его в процессе хранения или эксплуатации в

мартенсит может вызвать изменение размеров деталей подшипника. Для предотвращения этого необходимо удалить из структуры остаточный аустенит, что достигается путем обработки закаленной стали холодом. Такой обработке, например, подвергают прецизионные подшипники.

Для изготовления высокоскоростных подшипников используют особовысококачественную сталь, которую получают путем электрошлакового переплава, например, сталь ШХ15-Ш.

Для изготовления крупногабаритных роликовых подшипников диаметром до 2 м используют цементуемые стали, например, марки 12ХНЗА. Их подвергают газовой цементации на глубину около 5 мм, затем закаливают и проводят низкий отпуск.

Автоматные стали. Данные стали высокой обрабатываемости резанием используют для массового производства крепежных деталей на станках-автоматах. Они допускают механическую обработку резанием с высокими скоростями резания при высоком качестве обработанной поверхности. Достигается это технологическое преимущество автоматных сталей увеличением содержания в них серы и фосфора.

Сера находится в автоматных сталях в виде сульфида марганца, который, обладая смазывающим действием, облегчает процесс резания. Фосфор, растворяясь в феррите, повышает его хрупкость, что способствует измельчению стружки и получению гладкой блестящей поверхности стали при резании.

Однако большие добавки серы и фосфора снижают пластичность и вязкость стали. Кроме того, сера и фосфор сохраняют свое отрицательное влияние на свойства стали как вредные примеси: сера приводит к красноломкости, а фосфор придает сталям хладноломкость. Для уменьшения негативного влияния серы в автоматные стали вводят повышенное количество марганца (до 1,5 %), который связывает серу и сульфид марганца.

Введение свинца приводит к дальнейшему улучшению обрабатываемости автоматных сталей, скорость резания возрастает до 40 %

без снижения стойкости инструмента. Свинец не растворяется в стали, а находится в структуре в виде мелких частиц, что также способствует измельчению стружки. Кроме того, в процессе нагрева зоны фрикционного контакта режущего инструмента со сталью свинец плавится, что уменьшает коэффициент трения кромки резца с деталью.

Автоматные стали, легированные свинцом, находят широкое применение в отраслях массового машиностроения, например, потребителями стали АС40 являются автозаводы.

Обратим внимание, что в маркировке АС40 буква С обозначает не кремний, а свинец, что является исключением из общего правила маркировки легированных сталей. Цифра — содержание углерода, а не свинца, в стали. Свинец в автоматных сталях содержится в пределах 0,15... 0,35 %, его содержание в маркировке автоматных сталей не указывают.

Использование добавок свинца позволяет перевести в разряд автоматных и сложнoleгированные стали, например, автоматную сталь АС40ХГНМ. По обрабатываемости они превосходят углеродистые автоматные стали с повышенным содержанием серы и фосфора. Однако легирование углеродистых автоматных сталей не устраняет их основной недостаток, связанный с повышенной склонностью к коррозии. Это ограничивает применение легированных автоматных сталей для изготовления ответственных деталей машин.

Коррозионностойкие стали. Коррозия наносит огромный ущерб производственной деятельности. Коррозионное разрушение одной небольшой детали может вывести из строя машину огромной стоимости. При аварийной остановке технологического оборудования сумма ущерба возрастает многократно, так как в современных условиях каждая единица оборудования является частью высокопроизводительной технологической линии. При выходе из строя одной единицы оборудования вся линия вынужденно простаивает.

Пропорционально причиняемому ущербу на борьбу с коррозией затрачиваются огромные материальные и трудовые ресурсы. Разработано большое число методов борьбы с коррозионным разрушением металла. Из большого арсенала этих методов здесь рассмотрен наиболее рациональный, основанный на изменении состава металлического материала путем введения хрома, никеля, алюминия или кремния. В этом направлении деятельной борьбы с коррозией создана группа коррозионностойких сталей.

При введении в состав стали хрома в количестве не менее 13 % достигается коррозионная стойкость стали в атмосфере, морской воде, ряде кислот, щелочей, солей. В процессе взаимодействия стали с кислородом воздуха на ее поверхности образуется защитная пленка сложного оксида $(Cr,Fe)_2O_3$. Наличие хрома в структуре оксида придает защитной пленке новые свойства, отличающиеся от свойств оксида железа в виде ржавчины. Хромсодержащий оксид железа газоплотен, т.е. является препятствием для поступления новых порций кислорода к взаимодействию со сталью, он изолирует металл от воздействия внешней среды. Кроме того, защитная пленка имеет высокую адгезию (сцепляемость) к поверхности стали и не отделяется от поверхности металла.

Защитные свойства образующийся на поверхности слой оксидов приобретает только по достижении содержания хрома в стали 13 %, при этом изменение скорости коррозии происходит не постепенно, а скачкообразно (рис. 11). Если в легированной стали содержание хрома менее 13 %, то по коррозионной стойкости она не имеет преимуществ перед углеродистыми сталями. Такая сталь, как и углеродистая, подвержена коррозии.

Коррозионностойкие (нержавеющие) стали делят на хромистые и хромоникелевые. Хромистые являются сталями ферритного и мартенситного класса, а хромоникелевые относятся к сталям аустенитного класса.

Дадим сравнительную оценку коррозионной стойкости коррозионностойких сталей ферритного и аустенитного классов, исходя из механизма коррозии.

Установлено, что скорость взаимодействия металлов с химически активными средами возрастает под влиянием происходящих на рабочей поверхности электрохимических процессов.

Фазовый состав всех углеродистых, а также большинства низко- и среднелегированных сталей неоднороден. Различие электрофизических свойств фаз приводит к появлению множества микрогальванопар, а возникающие при наличии влажной среды токи зарядов ускоряют коррозию сталей. Поэтому минимальное влияние электрохимических процессов и, следовательно, максимальную коррозионную стойкость будут иметь стали однофазной структуры — хромистые стали ферритного класса и хромоникелевые стали аустенитного класса.

Однако неизбежные примеси, содержащиеся в коррозионностойких сталях ферритного и аустенитного классов, также могут образовывать микрогальванопары и таким образом повышать интенсивность коррозионных процессов. Для максимального растворения этих примесей, а также избыточных спецкарбидов в однофазной структуре такие стали подвергают термической обработке. При этом аустенит, который имеет гранецентрированную кубическую кристаллическую решетку, может растворить около 2 % углерода, а объемно-центрированная кубическая кристаллическая решетка феррита допускает растворение только менее 0,03 % углерода. Поэтому по коррозионной стойкости хромоникелевые стали примерно в 10 раз превосходят хромистые коррозионностойкие стали.

Хромистые стали в зависимости от содержания углерода могут относиться к ферритному и мартенситному классам.

Хромистые стали ферритного класса при низком содержании углерода имеют однофазную ферритную структуру, т. е. не претерпевают фазового превращения $\text{Fe}\alpha \leftrightarrow \text{Fe}\gamma$ и не могут упрочняться термической обработкой, т.е. они не поддаются закалке.

Отсутствие фазовых превращений имеет ту негативную сторону, что возникшая при нагреве, например, в процессе сварки, крупнозернистая

структура стали не может быть измельчена путем ее термической обработки. Из-за данного основного недостатка коррозионностойких сталей ферритного класса ее крупнозернистость может приводить к охрупчиванию, что ограничивает техническое применение хромистых сталей ферритного класса, несмотря на то, что из коррозионностойких сталей они наиболее дешевы.

Предупредить рост зерен ферритных сталей при нагреве и устранить их охрупчивание помогает введение в их состав в качестве легирующих элементов титана и азота. Титан образует с углеродом, который содержится в стали, карбиды, а азот, взаимодействуя с хромом, образует нитриды хрома. Дисперсные карбиды и нитриды выделяются по границам зерен и служат барьером для их роста.

Наиболее распространенными коррозионностойкими сталями ферритного класса являются стали с содержанием 13 % хрома, например, сталь 08X13, которую используют в турбостроении для изготовления лопаток гидротурбин и паровых турбин.

Увеличение содержания хрома повышает коррозионную стойкость хромистых сталей. Сталь с содержанием 17 % хрома является коррозионно-стойкой в растворах слабых кислот и широко применяется для изготовления технологического оборудования заводов пищевой промышленности и изделий бытовой пищевой утвари, как, например, сталь 12X17.

При содержании в стали 25 % хрома ее коррозионная стойкость позволяет противостоять горячим газовым средам. Такую сталь, например, сталь 15X25, применяют для изготовления газовых реторт, чехлов термопар и других устройств нагревательных агрегатов.

Верхний предел содержания хрома в коррозионно-стойких сталях составляет 25 % (иногда 28 %), так как при большем содержании хрома снижается вязкость стали, наблюдается ее охрупчивание.

Хромистые стали мартенситного класса отличаются от ферритной стали повышенным содержанием углерода. В процессе термической обработки они испытывают фазовое превращение, их можно подвергать закалке, в

результате которой они приобретают структуру и свойства мартенсита закали.

Коррозионностойкие стали мартенситного класса, например, сталь 40X13, используют для изготовления хирургического инструмента, промышленных ножей, деталей топливной аппаратуры и др. После закали их подвергают низкому отпуску.

Хромоникелевые стали имеют однофазную аустенитную структуру, вследствие чего так же, как и стали ферритного класса, не претерпевают фазового превращения $Fe\alpha \leftrightarrow Fe\gamma$ и поэтому не могут упрочняться термической обработкой, т.е. они не принимают закали. В то же время для них разработан режим термической обработки, аналогичный закалке, в результате которой сталь не приобретает структуру мартенсита.

Отливка хромоникелевой стали содержит дисперсные карбиды хрома, которые могут образовывать микрогальванопары и тем самым снижать коррозионную стойкость. Для растворения карбидов хрома в аустените сталь нагревают до 1100°C и далее охлаждают в воде, фиксируя образовавшуюся структуру, не допуская выделения избыточных карбидов.

Полученная в результате такой термической обработки однофазная аустенитная структура придает хромоникелевой коррозионностойкой стали высокую коррозионную стойкость.

По уровню физико-механических свойств и по коррозионной стойкости хромоникелевые коррозионностойкие стали превосходят хромистые. Хромоникелевые стали обладают высокой вязкостью разрушения, которая сохраняется и при отрицательных температурах. Кроме того, они технологичны: хорошо свариваются, допускают обработку давлением как в холодном, так и в нагретом состоянии, имеют хорошие литейные свойства. В процессе обработки давлением они упрочняются в результате наклепа. Поэтому хромоникелевые коррозионностойкие стали часто используют в виде проката.

К недостаткам хромоникелевых сталей можно отнести их плохую обрабатываемость резанием. Кроме того, хромоникелевые стали достаточно дороги вследствие наличия в них большого количества дефицитного никеля. Для снижения стоимости хромоникелевых сталей используют замену никеля марганцем.

Наибольшее распространение в промышленности получила коррозионностойкая хромоникелевая сталь 12Х18Н9. Основным недостатком этой и других марок хромоникелевых сталей является возможность межкристаллитной коррозии (МКК), т.е. возможность коррозии по границам зерен.

Проявляется МКК при нагреве хромоникелевой стали в интервале температур 500...700°C. Отметим, что до таких температур металл может нагреваться в зоне термического влияния природа. В процессе термической обработки они испытывают фазовое превращение, их можно подвергать закалке, в результате которой они приобретают структуру и свойства мартенсита закалки.

Коррозионностойкие стали мартенситного класса, например, сталь 40Х13, используют для изготовления хирургического инструмента, промышленных ножей, деталей топливной аппаратуры и др. После закалки их подвергают низкому отпуску.

Хромоникелевые стали имеют однофазную аустенитную структуру, вследствие чего так же, как и стали ферритного класса, не претерпевают фазового превращения $Fe\alpha \leftrightarrow Fe\gamma$ и поэтому не могут упрочняться термической обработкой, т.е. они не принимают закалки. В то же время для них разработан режим термической обработки, аналогичный закалке, в результате которой сталь не приобретает структуру мартенсита.

Отливка хромоникелевой стали содержит дисперсные карбиды хрома, которые могут образовывать микрогальванопары и тем самым снижать коррозионную стойкость. Для растворения карбидов хрома в аустените сталь

нагревают до 1100°C и далее охлаждают в воде, фиксируя образовавшуюся структуру, не допуская выделения избыточных карбидов.

Полученная в результате такой термической обработки однофазная аустенитная структура придает хромоникелевой коррозионностойкой стали высокую коррозионную стойкость.

По уровню физико-механических свойств и по коррозионной стойкости хромоникелевые коррозионностойкие стали превосходят хромистые. Хромоникелевые стали обладают высокой вязкостью разрушения, которая сохраняется и при отрицательных температурах. Кроме того, они технологичны: хорошо свариваются, допускают обработку давлением как в холодном, так и в нагретом состояниях, имеют хорошие литейные свойства. В процессе обработки давлением они упрочняются в результате наклепа. Поэтому хромоникелевые коррозионностойкие стали часто используют в виде проката.

К недостаткам хромоникелевых сталей можно отнести их плохую обрабатываемость резанием. Кроме того, хромоникелевые стали достаточно дороги вследствие наличия в них большого количества дефицитного никеля. Для снижения стоимости хромоникелевых сталей используют замену никеля марганцем.

Наибольшее распространение в промышленности получила коррозионностойкая хромоникелевая сталь 12Х18Н9. Основным недостатком этой и других марок хромоникелевых сталей является возможность межкристаллитной коррозии (МКК), т.е. возможность коррозии по границам зерен.

Проявляется МКК при нагреве хромоникелевой стали в интервале температур 500...700°C. Отметим, что до таких температур металл может нагреваться в зоне термического влияния при проведении процесса сварки. При таких температурах нагрева по границам зерен выделяются дисперсные карбиды хрома состава Cr_{23}C_6 . Вследствие низкого коэффициента диффузии легирующих элементов в образовании карбида участвуют только те атомы

хрома, которые расположены в приграничных участках зерен. В результате развития такого процесса приграничные участки постепенно обедняются хромом и, когда содержание хрома становится менее 13 %, зерна перестают быть коррозионно-стойкими.

При контакте с химически активной средой такая сталь начинает корродировать по границам зерен, связь между ними нарушается и материал теряет свою прочность. Данный вид дефекта опасен тем, что внешне деталь, прокорродировавшая насквозь по границам зерен, сохраняет свою форму и габариты, хотя практически не имеет прочности, т.е. достаточно небольшого усилия, чтобы она рассыпалась. В частности, на этом принципе основан один из способов получения порошка коррозионностойкой стали для нужд порошковой металлургии.

Для предупреждения межкристаллитной коррозии необходимо устранить возможность образования карбидов хрома. Этого можно достичь двумя путями — уменьшением содержания углерода в стали и введением в сталь более сильных, чем хром, карбидообразующих элементов.

Получение стали с низким содержанием углерода возможно, хотя техническое исполнение данного решения достаточно сложно. Однако пропорционально уменьшению содержания углерода в стали снижаются также и прочностные ее характеристики. Кроме того, снижение содержания углерода, хотя и может уменьшить вероятность МКК, но не устраняет ее первопричину, так как любая сталь — это сплав железа с углеродом, т. е. без углерода не будет и стали.

Радикальным решением проблемы МКК является использование более сильных, чем хром, карбидообразователей, в числе которых титан, реже — ниобий. Данные элементы в силу большего, чем у хрома, сродства к углероду связывают избыточный углерод, образуя соответствующие специальные карбиды, и тем самым предотвращают образование карбида хрома. Так, например, хромоникелевые коррозионностойкие стали 12X18H10T и 12X18H9Б не подвержены МКК в отличие от стали 12X18H9.

Благодаря данному решению были сняты ограничения на применение хромоникелевых коррозионностойких сталей в конструкциях, связанных с нагревом. Это позволило использовать данные стали в авиации, ракетостроении и других областях специального машиностроения.

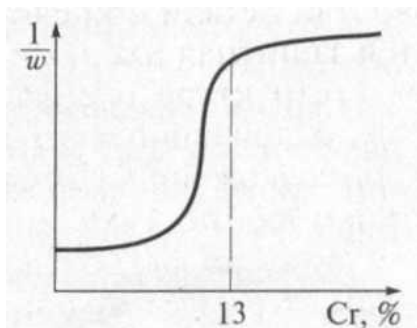


Рис. 11. Влияние содержания хрома на коррозионную стойкость стали: w — скорость коррозии

3.10 Легированные и низколегированные стали в автомобилестроении

Для изготовления автомобильных деталей применяют многие марки малоуглеродистых и среднеуглеродистых легированных и низколегированных сталей, предусмотренных ГОСТ 4543-2016 и ГОСТ 19281-89. Иногда применяют также стали, не включенные в настоящее время в ГОСТ и производящиеся по ТУ заводов автомобильной промышленности. В табл. 5 приводятся наиболее распространенные группы и марки легированных сталей (ГОСТ 4543-2016), примеры их применения при производстве автомобильных деталей и характерные варианты их термической обработки. Легированные стали, как правило, подвергаются термической или химико-термической обработке.

В обозначениях марок конструкционных легированных сталей цифра слева указывает среднее содержание в данной стали углерода в сотых долях процента; последующие буквы и цифры, расположенные правее букв, свидетельствуют о наличии и примерном содержании в данной стали (в процентах) легирующих компонентов. Например, сталь марки 12ХНЗА является высококачественной, легированной хромом и никелем, содержащей в среднем 0,12 % углерода (0,09-0,16), около 1 % хрома (0,60-0,90), примерно 3 % никеля (2,75—3,15). Для особенно сильно действующих на свойства

сталей легирующих компонентов, какими являются, в частности, молибден, титан, ванадий и бор, присутствие принятых для них индексов в обозначениях марки стали не означает, что их количество близко к 1 %. Обычно содержание молибдена не превышает 0,6 %, титана и ванадия 0,20 %, а бора ограничивается еще меньшими величинами.

Низколегированные стали (ГОСТ 19281-89) обычно содержат до 0,25 % недефицитных, но достаточно сильно действующих легирующих элементов. Использование этих сталей вместо углеродистых позволяет уменьшить массу и сечение деталей при обеспечении прежних или более высоких механических качеств. По сравнению с качественными углеродистыми сталями эти стали отличаются повышенной прочностью, износостойкостью, коррозионной стойкостью благодаря увеличенному содержанию в них марганца, хрома, меди, других присадок. Вместе с тем они обычно дешевле легированных сталей, поэтому использование их в автостроении с годами увеличивается. Особенно большое применение низколегированные стали получили при изготовлении деталей рам грузовых автомобилей (лонжеронов и поперечин), дисков и других деталей колес, картеров задних мостов.

Таблица 5 - Наиболее распространенные в автомобилестроении конструкционные легированные стали и детали, изготовленные из них

№	Группа стали	Марка стали	Детали	Термическая обработка
1	2	3	4	5
1	Марганцовистая	40Г, 50Г, 45Г2, 47ГТ	Полуоси, шатуны, коленчатые валы, двигатели	1. Улучшение 2. Нормализация или улучшение и закалка рабочих поверхностей ТВЧ
2	Хромистая	15Х, 20Х	Толкатели, поршневые пальцы, крестовины кардана, распределительные валы двигателей	Цементация, закалка, низкотемпературный отпуск
3	Хромистая	30Х, 35Х, 40Х, 45Х	Валы и шестерни коробок передач, балки передней оси, рычаги рулевого управления, крестовины и оси сателлитов, коромысла, болты коренных и шатунных подшипников двигателей	1. Улучшение 2. Улучшение и закалка рабочих поверхностей ТВЧ

1	2	3	4	5
4	Бористая	40Р, 45РП	Шатуны двигателей, полуоси и др.	1. Улучшение 2. Улучшение и поверхностная закалка
5	Хромомарганцевая	18ХГТ, 30ХГТ, 25ХГМ, 25ХГТ	Шкворни, распределительные валы, шестерни полуосей, и сателлиты, конические шестерни заднего моста, крестовины карданного шарнира, шестерни и валы коробок передач, ось шестерни заднего хода	Цементация или цианирование, закалка и низкотемпературный отпуск
6	Хромоникелевая	12ХН2, 12ХН3А, 20ХН3А, 40ХН	Поршневые пальцы, крестовины карданного шарнира, конические шестерни заднего моста, полуосевые шестерни, сателлиты, крестовины дифференциала	Цементация или цианирование, закалка и низкотемпературный отпуск
7	Хромомолибденовые	40Х2МА	Шатуны	Улучшение
8	Хромованадиевая	40ХФА, 60ХФА	Пружины клапанов, пружины подвески, торсионы полуосей, шатуны двигателей, коленчатые валы	1. Улучшение 2. Объемная закалка, высокотемпературный отпуск
9	Хромоникельмолибденовая	20ХН2М	Шестерни полуосей и сателлиты, конические шестерни главной передачи, червяки рулевого управления	Цементация или цианирование, закалка и низкотемпературный отпуск
10	Хромокремнемарганцевая	38ХГС	Полуоси	1. Улучшение 2. Улучшение и закалка шлицов
11	Хромомарганцевоникелевая и хромомарганцевоникелевая с титаном и бором	20ХГНР, 14ХГН, 19ХГН, 15ХГН2ТА	Валы и шестерни коробок передач, ось шестерни заднего хода, крестовины заднего хода, крестовины карданного шарнира и дифференциала, шестерни полуоси и сателлиты, конические шестерни заднего моста	Цементация или цианирование, закалка и низкотемпературный отпуск
12	Хромомолибденованадиевая	42ХМФА	Коленчатые валы	Улучшение и поверхностная закалка шеек ТВЧ
13	Хромомарганцевоникелевая с молибденом или титаном и хромомарганцевокремниевая с молибденом	20ХГНМ, 25ХГНМТ, 30Х2ГСМА	Валы и шестерни коробок передач, ведомая коническая шестерня главной передачи, сателлиты и крестовины дифференциала, полуоси	1. Нормализация или улучшение, цементация или цианирование, закалка и низкотемпературный отпуск 2. Улучшение, закалка шлицев ТВЧ

3.11 Рессорно-пружинные, высоколегированные жаростойкие и жаропрочные стали

Легированные рессорно-пружинные стали (ГОСТ 14959-2016) широко применяют в конструкциях отечественных автомобилей для изготовления деталей подвесок — пружин, листовых рессор, пластин торсионов автомобилей, а также клапанных пружин двигателей, пружин сцепления и различных других деталей. В меньшей степени применяют для изготовления различных пружин углеродистые стали, предусмотренные тем же ГОСТом. Рессорно-пружинные стали относятся к высокоуглеродистым, причем в качестве легирующих элементов для них особенно характерно содержание кремния, марганца, хрома и ванадия.

Высоколегированные жаростойкие и жаропрочные стали (ГОСТ 5632-72) применяют для изготовления клапанов автомобильных двигателей. В некоторых случаях на заготовку клапанов в индукторе при использовании специального флюса наплавляется кольцо из жаростойкого сплава на никель-хром-бористой основе. Для этой цели применяются, в частности, сплавы ЭП-616 и ЭП-616А (двигатели ВАЗ), ЭП-869 (двигатели КамАЗ-740). Полости клапанов двигателей ЗМЗ-53 и некоторых других заполняют металлическим натрием, испарение которого во время работы двигателя способствует снижению рабочих температур тарелок клапанов.

3.12 Марки сталей, чугунов и цветных сплавов, применяемых при изготовлении основных деталей отечественных автомобилей

Для изготовления корпусных деталей — блоков, картеров сцеплений, головок блока, а также трубопроводов применяются в основном алюминиевые сплавы разных марок и чугуны с пластинчатым графитом, модифицированные и специальные. Блоки и картеры сцепления ЗАЗ отливают из магниевых сплавов. Большинство деталей автомобилей семейства ВАЗ изготавливают из материалов по ТУ завода. Поршни изготавливают из жаростойких алюминиевых сплавов, в ряде случаев

негостированных, клапаны - из жаростойких высоколегированных сталей. Коленчатые и распределительные валы изготавливают из конструкционных сталей или высокопрочных чугунов. Для других деталей применяются качественные и высококачественные стали или модифицированные и специальные чугуны.

Материалом валов и шестерен являются легированные конструкционные стали, как правило, низкоуглеродистые. Только вторичный вал автомобилей ГАЗ изготавливается из углеродистой стали пониженной прокаливаемости марки 60ПП.

Материалом корпусных деталей задних мостов является чаще всего ковкий чугун. Вместе с тем в последние годы картеры стали часто изготавливать сварными; в этом случае их материалом являются низколегированные стали. Валы и шестерни задних мостов, так же как и у коробок передач, изготавливают обычно из легированных малоуглеродистых конструкционных сталей. Также как и аналогичные детали коробок, они подвергаются обычно цементации или цианированию, закалке и низкотемпературному отпуску. Наиболее распространенным материалом деталей карданных передач являются углеродистые качественные стали. Корпусные детали рулевых механизмов изготавливают из ковкого чугуна или цветных сплавов, остальные детали - из конструкционных сталей легированных или углеродистых.

Лекция 4. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

При изготовлении автомобильных деталей на автомобильных предприятиях широкое применение находят алюминиевые и цинковые сплавы, сплавы на медной и цинковой основе, антифрикционные сплавы, различного вида припой, в несколько меньшей степени применяются медно-никелевые и магниевые сплавы.

4.1. Цветные алюминиевые, цинковые и магниевые сплавы

Особенно большое распространение при изготовлении автомобильных деталей имеют алюминиевые сплавы литейные (ГОСТ 2685—75) и деформируемые (ГОСТ 4784-2019). Деформируемыми называются такие алюминиевые (или магниевые) сплавы, полуфабрикаты из которых (листы, прутки, профильный прокат, штамповки) могут изготавливаться обработкой давлением. Деформируемые сплавы применяют для изготовления поршней двигателей, поршней гидроцилиндров тормозов и сцеплений, различных мелких деталей, а также нормалей (заклепок и пр.).

Известно, что автомобильная промышленность является передовой отраслью отечественного машиностроения, в которой постоянно ведутся разносторонние исследования, направленные, в частности, на разработку новых, прогрессивных материалов и сплавов, обладающих высокими технологическими и эксплуатационными качествами. Это относится и к алюминиевым сплавам, используемым для изготовления поршней и корпусных деталей.

Магниевые сплавы по своим механическим качествам, как правило, уступают алюминиевым, зато отличаются технологичностью — обладают хорошими литейными свойствами. Марки магниевых сплавов применяются для отливки ненагруженных корпусов различных узлов и приборов.

Значительное применение в автомобилестроении имеют в настоящее время цинковые сплавы. Цинковые сплавы по ГОСТ 21437-95 включают четыре марки сплавов, две из которых относятся к категории литейных сплавов, а две — к сплавам, обрабатываемым давлением. Предусмотренные указанным ГОСТом марки сплавов предназначены для изготовления антифрикционных деталей (втулок, подшипников). ГОСТ 19424-97 "Сплавы цинковые литейные в чушках" и ГОСТ 25140-93 "Сплавы цинковые литейные" по химическому составу некоторых марок почти дублируют друг друга. Предусмотренные ГОСТами сплавы предназначены для изготовления корпусов сложной формы карбюраторов, бензонасосов, электротехнических

и других приборов методом литья под давлением с обеспечением выполнения тонких сечений с высокой точностью и гладкостью поверхностей, достигающей 8-го класса. Главным преимуществом этих сплавов является высокая жидкотекучесть, способность хорошо заполнять сложные формы; недостаток цинковых сплавов — низкая ремонтпригодность; при поломках соответствующие детали практически не подлежат пайке или сварке.

4.2. Цветные сплавы на медной и цинковой основе

Чистая медь имеет в автомобилестроении и авторемонтном производстве ограниченное применение, в основном в электроприборах и электролитических ваннах. Зато широко применяются медно-цинковые сплавы (латуни), оловянистые и безоловянистые бронзы.

Латуни подразделяются на литейные (ГОСТ 17711-93) и деформируемые (ГОСТ 15527-2004); последние в свою очередь подразделяются на томпаки, полутомпаки, латуни, трехкомпонентные и многокомпонентные латуни различного качественного и количественного состава.

При практическом использовании следует иметь в виду, что повышение процентного содержания меди в составе латуни улучшает ее пластичность, теплопроводность, электропроводность и коррозионную стойкость. Относительное повышение содержания цинка улучшает обрабатываемость латуни резанием, прирабатываемость, повышает износостойкость, снижает себестоимость латуни. Включение в состав латуни свинца увеличивает ее антифрикционные свойства. Наличие в латуни олова, марганца, кремния, железа повышает ее прочность и способствует улучшению антикоррозионных свойств.

Ремонт деталей и узлов, изготовленных из латуней, обычно производят пайкой. Материалы, применяемые на авторемонтных и автотранспортных

предприятиях для пайки латунных деталей, приводятся в следующем разделе.

В автомобилестроении и авторемонтном производстве широко применяются бронзы: оловянистые литейные (ГОСТ 613-79 и ГОСТ 614-97); оловянистые, обрабатываемые давлением (ГОСТ 5017-74); безоловянистые литейные (ГОСТ 493-79); безоловянистые, обрабатываемые давлением (ГОСТ 18175-78). Наиболее распространены для изготовления деталей оловянистые бронзы. Они характеризуются достаточной прочностью, высокими антифрикционными качествами, коррозионной стойкостью, хорошей теплопроводностью. Деформируемые оловянистые бронзы отличаются, кроме того, хорошими упругими свойствами. Повышение содержания олова в оловянистых бронзах увеличивает их прочность и твердость, но уменьшает пластичность и ударную вязкость.

В качестве легирующих добавок в оловянистую бронзу вводят цинк, свинец, никель, фосфор. Цинк и никель улучшают механические свойства бронзы, причем никель способствует измельчению зерна и улучшению структуры сплава; свинец и фосфор улучшают антифрикционные свойства и, кроме того, обрабатываемость резанием (фосфор) и износостойкость (свинец). Вместе с тем увеличение содержания фосфора более 0,35—0,40 % снижает механические свойства сплава. Следует отметить кремнистые бронзы марки БрКМц3-1 и бериллиевые бронзы марок БрБ2, БрБНТ1,7; БрБНТ1,9, обладающие упругостью, прочностью, химической стойкостью, высоким значением усталостной выносливости. Эти бронзы применяются для изготовления ответственных пружин: термостатов, пробок бензобаков, клапанов бензонасосов, пружин карбюраторов и т. п. Некоторые сплавы, в особенности МНЖКТ5-1-02-02, широко применяются в авторемонтном производстве для сварки деталей, изготовленных из цветных сплавов.

4.3. Припой и антифрикционные сплавы

Антифрикционные сплавы широко применяются в конструкциях автомобилей в качестве материала трущихся поверхностей вкладышей коленчатых валов двигателей и различных втулок. В качестве антифрикционных сплавов в автостроении и авторемонтном производстве находят применение оловянистые, свинцовые и кальциевые баббиты, свинцовистые бронзы и антифрикционные сплавы на алюминиевой основе. Преимуществом сталеалюминиевых вкладышей является их прочность, хорошая теплопроводность, температуростойкость, относительная дешевизна.

Припой различных групп и марок имеют широкое применение в автомобильной промышленности, на авторемонтных и автотранспортных предприятиях. Оловянно-свинцовые припои (ГОСТ 21930-76) имеют наибольшее применение на авторемонтных и автотранспортных предприятиях. Положительными свойствами серебряных припоев являются высокая механическая прочность, пластичность, электропроводность, коррозионная стойкость.

Лекция 5. МЕТАЛЛЫ И МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

5.1. Металлы и материалы, применяемые при восстановлении автомобильных деталей сваркой, наплавкой и напылением

К сварочным и наплавочным материалам относятся: сварочная, наплавочная, порошковая проволоки; электроды; присадочные прутки; покрытия (обмазки), флюсы, горючие, защитные, плазмообразующие газы; наплавочные порошки, смеси порошков и другие материалы.

Сварочная проволока предназначена для изготовления электродов для ручной дуговой сварки и наплавки металлических деталей и конструкций. В авторемонтном производстве малоуглеродистую сварочную проволоку иногда используют и при восстановлении деталей механизированными видами наплавки. ГОСТ 2246-70 предусматривает 75 марок сварочной проволоки.

В ремонтном производстве при восстановлении деталей механизированными способами наплавки широко используются многие марки наплавочной проволоки. Особенно распространены проволоки марок Нп-65; Нп-80; Нп-30ХГСА; Нп-40Х2Г2М; Нп-50ХФА; Нп-30Х13 и др.

Электроды широко применяются в авторемонтном производстве.

Наряду с электродами общего назначения при восстановлении авто-мобильных деталей применяют металлические электроды, предусмотренные ГОСТ 10051—75 для ручной наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Указанные электроды имеют стержень из легированной или высоколегированной стали и качественную обмазку.

В общем случае детали из малоуглеродистых, углеродистых сталей свариваются хорошо, из среднеуглеродистых — удовлетворительно, из высокоуглеродистых — плохо. Однако из малоуглеродистых сталей изготавливаются преимущественно тонколистовые детали кузовов, кабин, оперения, облицовок и т. п., которые, несмотря на малое содержание углерода, сваривать сложно из-за опасности прожога металла.

Сварка деталей из легированных сталей затруднена вследствие того, что легирующие элементы диффундируют в металл шва, вызывают образование тугоплавких окислов, остающихся в металле после остывания, могут приводить к частичной самозакалке остывающего металла, различной тепловой осадке металла шва и детали, к хрупкости металла в горячем состоянии и в результате всего этого — к возникновению значительных внутренних напряжений, деформаций и трещин. Кроме того, при сварке обычно полностью или частично нарушается термическая обработка деталей,

которую в условиях ремонтных предприятий не всегда возможно восстановить.

Для улучшения качества наплавленного металла применяют предварительный перед сваркой подогрев деталей, последующий их отжиг, специальные электроды и обмазки, выбирают оптимальные режимы наплавки.

Сварка и наплавка деталей из серого и модифицированного чугуна сопряжена с трудностями, которые вызываются образованием при сварке тугоплавких окислов железа (температура плавления $1350\text{—}1400^{\circ}\text{C}$) и кремния (температура плавления 1600°C), температура плавления которых значительно превышает температуру плавления чугуна (1200°C), интенсивным отбелом расплавленного чугуна при его охлаждении на воздухе, хрупкостью чугуна. Образующиеся тугоплавкие окислы засоряют сварочный шов или наплавленный металл, в результате отбела получается твердый трудно обрабатываемый шов, характеризующийся неоднородной структурой. Возникают внутренние напряжения в металле, которые могут вызвать деформации и трещины, в особенности у деталей сложной конфигурации с неравномерной толщиной стенок.

Особенно сложно сваривать детали из ковкого чугуна, свободный углерод которого при сварке, с одной стороны, выгорает, образуя поры и раковины в металле, с другой — переходит в связанное состояние, интенсивно отбеливаясь.

При сварке чугунных деталей применяют горячую (при подогреве деталей до $600\text{--}650^{\circ}\text{C}$) газовую и холодную электродуговую сварку. Для растворения тугоплавких окислов при газовой сварке применяют специальные флюсы, при дуговой - многокомпонентные обмазки электродов. В качестве присадочного материала при горячей газовой сварке используют чугунные прутки марок ПЧ1, ПЧ2 и др.

При холодной электродуговой сварке чугунных деталей применяют специальные электроды: стальные, на медной или никелевой основе; во всех

случаях — со специальными сложными покрытиями (обмазками). Для уменьшения отбела при сварке деталей из чугуна с пластинчатым, шаровидным графитом или из ковкого чугуна применяют также так называемую сварку-пайку присадочными прутками из цветных сравнительно легкоплавких сплавов, при использовании которых основной металл детали (чугун) не нагревается до температуры плавления.

Сварка автомобильных деталей из алюминиевых сплавов связана со значительными трудностями вследствие легкой окисляемости алюминия и хрупкости его в нагретом состоянии, низкой температуры плавления алюминия (657°C) и тугоплавкости его окислов (2050°C), высокой теплопроводности алюминия, значительного коэффициента теплового расширения (вдвое большего, чем у стали) и соответственно большой усадки сварочного шва, постоянства цвета расплавленного металла, что мешает ориентироваться сварщику.

Несмотря на трудности, сварку деталей из алюминиевых сплавов осуществляют по АРП различными способами. Преимущественное распространение в последние годы получила сварка алюминиевых деталей в среде аргона, применяется также сварка электродами со специальной обмазкой и газовая сварка с использованием специальных флюсов. Во всех случаях в качестве электродов или присадочных прутков используют алюминиевую сварочную проволоку по ГОСТ 7871-2019 по возможности наиболее близкую по химическому составу к материалу основной детали. При сварке в среде аргона при толщине стенок деталей не более 4 мм используют вольфрамовые неплавящиеся электроды по ГОСТ 23949—80. Ионы вольфрама при сварке бомбардируют свариваемые поверхности, разрушая на них окисную алюминиевую пленку, чем обеспечивают надежное сцепление частиц наплавляемого и основного металла.

При восстановлении автомобильных деталей механизированными видами наращивания наибольшее применение нашли механизированная электродуговая наплавка под флюсом, вибродуговая наплавка, дуговая

наплавка в среде углекислого газа, а в последнее время также широкослойная наплавка с использованием ферромагнитной шихты, газотермическое и плазменное напыление (металлизация).

В качестве наплавочных материалов при механизированных видах наплавки наиболее широко используют наплавочную проволоку (ГОСТ 10543-98), пружинную высокоуглеродистую проволоку (ГОСТ 9389-75), сварочную проволоку (ГОСТ 2246-70), порошковую проволоку, порошки и смеси порошков. Наиболее распространенный диаметр используемых наплавочных проволок 1,2 — 1,8 мм.

Механизированная наплавка под флюсом благодаря защите наплавляемого металла от вредного воздействия атмосферного воздуха обеспечивает при правильной технологии высокие качественные результаты. В авторемонтном производстве находят применение плавленные и керамические флюсы, а иногда и их смеси.

Плавленные флюсы получают сплавлением исходных материалов преимущественно в электропечах. В их состав входят шлакозащитные элементы, стабилизирующие горение дуги, и другие элементы. Они имеют малую гигроскопичность, хорошую однородность, высокие технологические свойства, отличаются дешевизной. Поэтому они преимущественно применяются при восстановлении автомобильных деталей. Недостатком плавленных флюсов является их слабая раскислительная способность и невозможность введения в их состав ферросплавов; по этой причине плавленные флюсы практически не легируют наплавленный металл. Керамические флюсы получают смешением отдельных составляющих на жидком стекле. В них можно вводить ферросплавы и легирующие элементы в широких пределах, в чем и заключается их преимущество. Однако они дороги и неоднородны по химическому составу. Наиболее распространенная в авторемонтном производстве марка керамического флюса АНК-18. Для удаления влаги флюсы перед употреблением рекомендуется прокалывать.

Если при наплавке под слоем флюса легирование наплавленного металла может осуществляться по-разному за счет применения легированной проволоки, использования специальных флюсов и того и другого одновременно, то при вибродуговой наплавке легирование возможно только через проволоку. Зато при последнем способе благодаря подаче в зону сплавления охлаждающей жидкости и прерывистости процесса представляется возможным получать твердый и износостойкий слой непосредственно после наплавки обычной углеродистой проволокой без термической обработки восстанавливаемых деталей. Термическое влияние в глубину детали здесь меньшее, чем при других наплавочных процессах, что позволяет применять вибронаплавку для восстановления стальных деталей малого диаметра, а также поверхностей чугунных деталей, в том числе выполненных из ковкого чугуна. При отключении охлаждающей жидкости этим способом можно восстанавливать наружные резьбовые поверхности деталей.

Наплавка в среде углекислого газа нашла широкое применение при сварке тонколистовых деталей, а также наплавке наружных гладких и резьбовых стальных поверхностей. При восстановлении деталей этим способом применяются проволоки, в состав которых входит кремний, марганец или хром. Указанные металлы являются восстановителями и связывают атомарный кислород, образующийся в результате распада углекислого' газа под влиянием высоких сварочных температур, чем предотвращают окисление наплавленного металла.

В последние годы в автомобилестроении и авторемонтном производстве для получения поверхностей, отличающихся высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью, стали применять специальные легированные, часто тугоплавкие материалы и сплавы. Эти материалы и сплавы используются в виде прутков, порошков, смесей порошков, специальной шихты, порошковой проволоки, наносятся и

оплавляются газопламенным и индукционным методами, плазменной металлизацией или наплавкой.

5.2. Металлы и материалы, применяемые для наращивания деталей электролитическими покрытиями

Электролитические покрытия применяются в авторемонтном производстве для наращивания изношенных поверхностей деталей, повышения их износостойкости, в декоративных целях и для предупреждения коррозии. Кроме того, никелевые и медные электролитические осадки могут использоваться как подслои под другие покрытия, а медные осадки еще и перед цементацией и цианированием для защиты тех поверхностей деталей, которые не требуют насыщения углеродом и азотом.

Перед электролитическим хромированием и никелированием покрываемые поверхности обычно подвергают тонкому шлифованию и полированию с использованием шлифовальных и полировальных кругов.

Наибольшее применение в авторемонтном производстве нашли войлочные круги как наиболее дешевые: мягкие - для шлифования деталей из алюминиевых и цинковых сплавов; твердые — для шлифования стальных деталей. При тонком шлифовании войлочными кругами может быть обеспечен 8-9-й класс шероховатости по ГОСТ 2789-79. Полировальные круги изготовляют из войлока, сукна, фетра, бязи, миткаля, байки и киперной ткани. На рабочую поверхность полировальных кругов наносят полировальные пасты. Главнейшими составляющими полировальных паст являются абразивы (окись хрома, окись алюминия, венская известь и др.) и связующие вещества (стеарин, парафин, жир и т. д.). В целях повышения эффективности полирования в состав паст целесообразно включать поверхностно-активные вещества: олеиновую кислоту, различные эмульгаторы и пр. При ремонте деталей железнением шлифование и

полирование их поверхностей мягкими (войлочными) кругами не производится.

Поверхности деталей, подвергаемые электролитическому наращиванию, должны быть тщательно очищены. Смазку и жир в электролитических цехах обычно удаляют с поверхности деталей натиранием составами, приготовляемыми на основе венской извести, или обработкой в щелочных растворах в специальных ваннах. Для лучшего их действия в щелочные, растворы вводят специальные добавки-эмульгаторы, обволакивающие масляные капли и способствующие отрыву их от поверхности деталей. В качестве эмульгаторов при подготовке поверхностей под наращивание применяют мыло, жидкое стекло, декстрин и др.

Эффективны эмульгаторы ОП-7, ОП-10.

По сравнению с горячим химическим обезжириванием более эффективно горячее электрохимическое обезжиривание в электролитических ваннах. Очищаемая деталь обычно подключается в качестве катода. В качестве анода рекомендуется применять никелевые или стальные никелированные пластины. Возможно и обратное подключение (деталь-анод) и даже работа на переменном токе. Обезжиривание деталей во всех случаях объясняется интенсивным выделением на их поверхностях пузырьков газа (кислорода и водорода), разрывающих жировую пленку.

Процесс снятия окисной микропленки с поверхностей деталей перед покрытиями называется декапированием, или анодным травлением. Этот процесс может осуществляться химическим и электрохимическим способами. В авторемонтном производстве, как правило, применяется электрохимическое декапирование. Применительно к хромированию и никелированию оно может осуществляться непосредственно в рабочих ваннах для наращивания переключением на 30—50 с полярности ванны (деталь на это время становится анодом) или в специальных ваннах. При остаивании декапирование (анодное травление) всегда производится в специальных ваннах. При декапировании деталь подключается в качестве

анода. Катодами в кислых растворах служат свинцовые пластины, в щелочных — железные.

В авторемонтном производстве для восстановления деталей электролитическим наращиванием применяются в настоящее время хромирование, осталивание, покрытия на железоцинковой, железоникелевой, железоцинкомарганцевой, железомарганцевой и других основах. Для получения защитных и декоративных покрытий применяют цинкование, меднение, кадмирование, анодирование, никелирование, хромирование. В большинстве случаев электролитические покрытия наносятся в специальных ваннах; довольно широко применяются также проточно-струйные процессы и электролитическое натирание, осуществляемые на специальных установках.

Для восстановления изношенных поверхностей деталей в авторемонтном производстве широкое применение получили покрытия электролитическим железом (осталивание). Для этой цели применяют электролиты горячие, холодные и пониженной температуры. По составу компонентов эти электролиты подразделяются на хлористые, хлористо-марганцевые, хлористо-сульфатные и др.; имеется также положительный опыт использования для восстановления деталей железомарганцевых, железоцинковых, цинконикелевых и других сложных по составу покрытий. Покрытия, получаемые при указанных процессах, уступают хромовым по твердости и износостойкости, а также по надежности их сцепления с основным металлом, зато процесс электролитического железнения в несколько раз более производительный по отношению к хромированию.

Электролит для железнения в хлористых ваннах получают травлением очищенной от грязи, окислов и жира металлической стружки малоуглеродистой стали в 50%-ном растворе соляной кислоты. Можно также получить хлористый электролит травлением восстановленного железного порошка (например, толченой прокатной окалины) или проработкой током

раствора хлорного железа, в результате чего трехвалентное железо восстанавливается до двухвалентного.

Аноды при железнении применяют круглой формы, их следует завешивать в мешочки из стеклоткани и не реже одного раза в смену вынимать из ванны и очищать стальными щетками. Ванны для электролитического железнения рекомендуется оснащать устройствами для фильтрации и циркуляции электролита.

Все большее распространение в последние годы приобретает процесс восстановления поверхностей автомобильных деталей (внутренних и наружных) электролитическим натиранием. Процесс привлекает высокой производительностью, возможностью нанесения покрытий на стальные, чугунные и алюминиевые поверхности. При осуществлении процесса используются металлические аноды из кислотостойких металлов с облицовкой из фетра, поролона или другого гигроскопического материала, которым при работе сообщается вращательное и поступательное движение. При осаждении непрерывно возникают электролитические микро-ванны в месте временного контакта поверхности детали и пропитанной электролитом облицовки анода. Благодаря непрерывной подаче электролита создается возможность использования высоких плотностей тока. При электролитическом натирании в зависимости от особенностей процесса представляется возможным использовать разнообразные по составу электролиты.

Лекция 6. КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Механическое разрушение можно определить как любое изменение размера, формы или свойств материала конструкции, машины или отдельной детали, вследствие которого конструкция или машина уже не может удовлетворительно выполнять свои функции. Основной задачей конструктора является создание такой конструкции, которая выполняла бы

предназначенные ей функции в течение заданного срока и при этом была бы конкурентоспособной. Успешное создание конкурентоспособных изделий, которые не разрушались бы преждевременно, может быть осуществлено лишь при умении предвидеть и оценивать вероятность всех возможных видов разрушения, представляющих опасность для создаваемых изделий. Чтобы выявить возможные виды разрушения, необходимо, по крайней мере, иметь представление обо всех встречающихся на практике видах разрушения и об условиях, при которых они могут происходить. Если конструктор желает добиться успеха в предотвращении разрушения в течение заданного срока эксплуатации изделия, он должен хорошо владеть аналитическими и (или) эмпирическими методами оценки возможности разрушений. Ясно, что исследование разрушения, его предсказание и предотвращение являются важнейшими задачами конструктора, желающего добиться определенного успеха.

Проектирование представляет собой итерационный процесс, целью которого является создание новой или усовершенствование уже существующей технической системы (или устройства) для удовлетворения потребностей или желаний человека при условии экономного расходования ресурсов и соблюдении требований охраны окружающей среды. Основной целью любого технического проекта является удовлетворение потребностей или желаний человека, иначе это будет для инженера пустой тратой времени. Создает ли конструктор новое устройство или модернизирует уже существующее, он должен стремиться создать «наилучшую», или оптимальную, конструкцию с учетом, конечно, ограниченности выделенных ему времени и средств. К сожалению, при создании сложных технических систем условия абсолютной оптимальности конструкции зачастую невозможно определить, а тем более практически невозможно создать такую конструкцию. Если даже и удастся определить условия оптимальности конструкции, создание ее может потребовать очень больших затрат. Возникает необходимость оптимизации конструкции инженерными

средствами по ее характеристикам, сроку эксплуатации, весу, стоимости или по всем этим критериям одновременно при условии, конечно, осознания ответственности за сохранность ресурсов и окружающей среды.

Появление новых материалов, необходимость повышения эксплуатационных скоростей и температур, необходимость снижения веса, уменьшения объема, увеличения сроков эксплуатации, снижения стоимости и достижения экологической совместимости — все это вызывает необходимость совершенствования методов расчета.

Например, обычными становятся скорости вращения вала 30 000 об/мин и более и температура эксплуатации 1100°C и выше. Многим инженерам приходится иметь дело с режимами сверхзвуковых полетов и космическими условиями, ядерным облучением в сочетании с повышенными температурами и длительным воздействием динамических нагрузок. Не менее серьезные проблемы возникают в связи с созданием сверхминиатюрной техники протезов для сердечнососудистой системы или других органов человека.

Все это вынуждает конструкторов и расчетчиков более тщательно исследовать поведение материалов, внимательнее изучать особенности условий эксплуатации, добиваться лучшего понимания разнообразных видов механического разрушения. Возникает необходимость лучшего понимания особенности напряженно-деформированного состояния при динамическом нагружении в неблагоприятных условиях и влияния полей остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления. Осознание того, что во всех реальных материалах и конструкциях с самого начала существуют трещиноподобные дефекты, заставило разработать новые методы, позволяющие исследовать распространение трещин в условиях как монотонных, так и циклических нагружений. Возможность контроля и ремонта стали такими же важными критериями качества конструкции, как надежность и работоспособность.

Противоречащим требованиям увеличения мощности и уменьшения размеров можно удовлетворить, либо разрабатывая новые, более прочные и жесткие материалы, либо эффективнее используя прочность и жесткость имеющихся материалов. Первая из этих возможностей относится к области материаловедения. Вторая же возможность является основной задачей конструкторов и расчетчиков. Для более эффективного использования прочности и жесткости существующих материалов в условиях постоянно возрастающих требований к технике завтрашнего дня конструктору потребуется в полной мере использовать доступные ему аналитические методы, инженерный опыт, творческую выдумку и интуицию.

В некотором смысле «идеальной» конструкцией была бы такая, которая полностью разрушилась бы по истечении заранее заданного срока. Другими словами, каждая деталь каждого элемента машины должна быть спроектирована так, чтобы она обращалась в пыль в точно заданный момент времени. Однако по многим причинам создание такой конструкции невозможно и, вероятно, даже нежелательно, хотя именно в такой конструкции наиболее полно использовались бы возможности материала.

Если бы было можно изготовить такую «идеальную» конструкцию, непременно потребовались бы проведение уточненных исследований, большого количества сложных экспериментов, полного анализа всех свойств материала, а также точное задание эксплуатационных условий и, конечно, талантливый конструктор, который мог бы осуществить все это. Поскольку проведение таких исследований требует больших затрат как времени, так и средств, грамотный инженер должен в каждом конкретном случае уметь оценить целесообразность затрат средств и труда. Ясно, что так называемая идеальная конструкция, стоимость которой в десять раз превышает стоимость «неидеальной», но вполне приемлемой конструкции, не может быть предметом гордости инженера. Вопрос о том, когда следует остановиться при расчетах и приступить к изготовлению конструкции, является основным для каждого инженера и руководителя. Чтобы выяснить,

достигнуты ли основные цели проектирования, обычно анализируются и учитываются следующие факторы:

1. Все детали машины или конструкции должны передавать нагрузку и совершать необходимые движения эффективно и экономично.
2. Ни одна деталь не должна разрушаться раньше некоторого заданного срока эксплуатации.
3. Каждая деталь должна выполнять предназначенную ей функцию, не мешая функционированию других частей машины.
4. Деталь должна быть такой, чтобы ее можно было изготовить и смонтировать в машине.
5. Стоимость готовой детали должна соответствовать ее назначению.
6. Вес детали и занимаемый ею объем должны соответствовать назначению.
7. Должна быть обеспечена возможность обслуживания и ремонта в процессе всего срока эксплуатации конструкции деталей, для которых это требуется.
8. Машина или конструкция должна не только удовлетворительно функционировать в течение заданного времени, но и быть конкурентоспособной и прибыльной для изготовителя.

6.1. Общие требования, предъявляемые к конструкционным материалам

Конструкционными называют материалы, предназначенные для изготовления деталей машин, приборов, инженерных конструкций, подвергающиеся механическим нагрузкам. Детали машин и приборов характеризуются большим разнообразием форм, размеров, условий эксплуатации. Они работают при статических, циклических и ударных нагрузках, при низких и высоких температурах, в контакте с различными средами. Эти факторы определяют требования к конструкционным

материалам, основные из которых — эксплуатационные, технологические и экономические.

Эксплуатационные требования имеют первостепенное значение. Для того чтобы обеспечить работоспособность конкретных машин и приборов, материал должен иметь высокую конструкционную прочность.

Конструкционной прочностью называется комплекс механических свойств, обеспечивающую надёжную и длительную работу материала в условиях эксплуатации.

Механические свойства, определяющие конструкционную прочность и выбор конструкционного материала, будут рассмотрены далее. Требуемые значения механических свойств материала для конкретного изделия зависят не только от силовых факторов, но и от воздействия на него рабочей среды и температуры.

Среда — жидкая, газообразная, ионизированная, радиационная, в которой работает материал, оказывает существенное и преимущественно отрицательное влияние на его механические свойства, снижая работоспособность деталей. В частности, рабочая среда может вызывать повреждение поверхности вследствие коррозионного растрескивания, окисления и образования окалина, а также изменение химического состава поверхностного слоя в результате насыщения нежелательными элементами (например, водородом, вызывающим охрупчивание). Кроме того, возможны разбухание и местное разрушение материала под действием ионизационного и радиационного облучения. Для того чтобы противостоять рабочей среде, материал должен обладать не только механическими, но и определенными физико-химическими свойствами: стойкостью к электрохимической коррозии, жаростойкостью (окалиностойкостью), радиационной стойкостью, влагостойкостью, способностью работать в условиях вакуума и др.

Температурный диапазон работы современных материалов очень широк — от -269 до 1000°C , а в отдельных случаях до 2500°C . Для

обеспечения работоспособности при высокой температуре от материала требуется жаропрочность, а при низкой температуре — хладостойкость.

В некоторых случаях важно также требование определенных магнитных, электрических, тепловых свойств, высокой стабильности размеров деталей (особенно высокоточных деталей приборов).

Технологические требования (технологичность материала) направлены на обеспечение наименьшей трудоемкости изготовления деталей и конструкций. Технологичность материала оценивается обрабатываемостью резанием, давлением, свариваемостью, способностью к литью, а также прокаливаемостью, склонностью к деформации и короблению при термической обработке. Технологичность материала имеет большое значение, так как от нее зависят производительность и качество изготовления деталей.

Экономические требования сводятся к тому, чтобы материал имел невысокую стоимость и был доступным. Стали и сплавы по возможности должны содержать минимальное количество легирующих элементов. Использование материалов, содержащих легирующие элементы, должно быть обосновано повышением эксплуатационных свойств деталей.

Экономические требования, так же как и технологические, приобретают особое значение при массовом масштабе производства.

Таким образом, качественный конструкционный материал должен удовлетворять комплексу требований.

6.2. Конструкционная прочность материалов и критерии ее оценки

Конструкционная прочность — комплексная характеристика, включающая сочетание критериев прочности, жесткости, надежности и долговечности.

Критерии прочности материала выбирают в зависимости от условий его работы. При статических нагрузках критериями прочности являются временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$ и предел текучести $\sigma_{0,2}$ (σ_T), характеризующие

сопротивление материала пластической деформации. Характеристики σ_B и $\sigma_{0,2}$ используют также для оценки прочности деталей при кратковременных циклических перегрузках и при малом числе циклов ($< 10^3$).

Поскольку при работе большинства деталей пластическая деформация недопустима, то их несущую способность, как правило, определяют по пределу текучести. Для приближенной оценки статической прочности используют твердость HB (для сталей справедливо эмпирическое соотношение $\sigma_B = HB/3$).

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

По значениям выбранных критериев прочности рассчитывают допустимые рабочие напряжения. При этом, чем больше прочность материала, тем выше допустимые рабочие напряжения и меньше размеры и масса детали.

Однако повышение уровня прочности материала и, как следствие, рабочих напряжений сопровождается увеличением упругих деформаций

$$\epsilon_{\text{упр}} = \sigma/E,$$

где E — модуль нормальной упругости.

Для ограничения упругой деформации материал должен обладать высоким модулем упругости (или сдвига), являющимся критерием его жесткости. Именно критерии жесткости, а не прочности обуславливают размеры станин станков, 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, наоборот, важно обеспечить большие упругие перемещения. Поскольку

$$\epsilon_{\text{упр}}^{\text{max}} = \frac{s_{\text{упр}}}{E},$$

то от материала требуются высокий предел упругости и низкий модуль упругости.

Для материалов, используемых в авиационной и ракетной технике, важна эффективность материала по массе. Она оценивается удельными характеристиками: удельной прочностью $\sigma_v/(\rho g)$ (где ρ — плотность материала; g — ускорение свободного падения) и удельной жесткостью $E/(\rho g)$.

Таким образом, в качестве критериев конструкционной прочности выбирают те характеристики, которые наиболее полно отражают прочность в условиях эксплуатации.

Кроме стандартных механических характеристик σ_v и $\sigma_{0,2}$, характеризующих металлургическое и технологическое качество материала, для оценки конструкционной прочности необходимы характеристики прочности при рабочих температурах и в эксплуатационных средах.

Например, для расчета на прочность вала, работающего во влажной атмосфере при 250°C , необходимы σ_v и $\sigma_{0,2}$, E при такой температуре, а также σ_{-1} , определенный во влажной среде и при нагреве.

Надежность — свойство материала противостоять хрупкому разрушению. Хрупкое разрушение 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. Известно немало аварий из-за хрупкого разрушения корпусов судов, ферм мостов, трубопроводов и других конструкций.

Для предупреждения хрупкого разрушения конструкционные материалы должны обладать достаточной пластичностью (δ , ψ) и ударной вязкостью (KCU). Однако эти параметры надежности, определенные на небольших лабораторных образцах без учета условий эксплуатации конкретной детали, достаточно показательны лишь для мягких малопрочных материалов. Между тем стремление к уменьшению металлоемкости конструкций ведет к более широкому применению высокопрочных и, как

правило, менее пластичных материалов с повышенной склонностью к хрупкому разрушению. Необходимо также учитывать то, что в условиях эксплуатации действуют факторы, дополнительно снижающие их пластичность, вязкость и увеличивающие опасность хрупкого разрушения. Это концентраторы напряжений (надрезы), понижение температуры, динамические нагрузки, увеличение размеров деталей (масштабный фактор).

Чтобы избежать внезапных поломок в условиях эксплуатации, необходимо учитывать трещиностойкость материала. Трещиностойкость — группа параметров надежности, характеризующих способность материала тормозить развитие трещины.

Количественная оценка трещиностойкости основывается на линейной механике разрушения. В соответствии с ней очагами разрушения высокопрочных материалов служат небольшие трещины эксплуатационного или технологического происхождения (могут возникать при сварке, термической обработке), а также трещиноподобные дефекты (неметаллические включения, скопления дислокаций и т.п.). Трещины являются острыми концентраторами напряжений, местные (локальные) напряжения, в вершине которых могут во много раз превышать средние расчетные напряжения.

Для трещины длиной l и радиусом r напряжение в вершине

$$s_{\text{уср}}^{\text{max}} = 2s \sqrt{l/r}. \quad (1)$$

Концентрация напряжений тем больше, чем длиннее трещина и острее ее вершина.

Для пластичных материалов опасность таких дефектов невелика. В результате перемещения дислокаций у вершины трещины протекает местная пластическая деформация, которая вызывает релаксацию (снижение) локальных напряжений и их выравнивание. К тому же увеличение плотности дислокаций и вакансий в вершине трещины сопровождается ее за-туплением, и дефект перестает играть роль острого концентратора напряжений.

Хрупкие материалы, наоборот, чрезвычайно чувствительны к надрезам. В силу того, что дислокации заблокированы и пластическая деформация невозможна, при увеличении средних напряжений локальные напряжения повышаются настолько, что вызывают разрыв межатомных связей и развитие трещины. Рост трещины не тормозится, как в пластичных материалах, а наоборот, ускоряется. После достижения некоторой критической длины наступает самопроизвольный лавинообразный рост трещины, вызывающий хрупкое разрушение.

Так как высокопрочные материалы обладают определенной пластичностью, то для них реальную опасность представляют трещины не любых размеров, а только критической длины $l_{кр}$. Подрастание трещины до $l_{кр}$ тормозится в них местной пластической деформацией. Но при определенном сочетании рабочего напряжения и длины дефекта равновесное положение трещины нарушается, и происходит самопроизвольное разрушение.

Оценку надежности высокопрочных материалов по размеру допустимого дефекта (меньше критического) проводят по критериям Ж. Ирвина. Им предложено два критерия трещиностойкости, из которых наибольшее применение имеет критерий K — коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины. Он определяет растягивающие напряжения σ_y в любой точке (рис. 13) впереди вершины трещины

$$\sigma_y = K / \sqrt{2\rho x} \quad (2)$$

Знаменатель дроби обращается в единицу при $x \approx 0,16$, поэтому K численно равен σ_y на расстоянии $\sim 0,16$ мм от вершины трещины.

Критерий K для наиболее жесткого нагружения (плоская деформация растяжением) обозначают K_I , а при достижении критического значения, когда стабильная трещина переходит в нестабильную, — K_{Ic} . Критерий K_{Ic} показывает, какого значения (интенсивности) достигает напряжение вблизи

вершины трещины в момент разрушения. Он связывает приложенное среднее напряжение с критической длиной трещины:

$$K_{1csp} = s \sqrt{\alpha p l}, \quad (3)$$

где α — безразмерный коэффициент, характеризующий геометрию трещины.

Из соотношения (3) следует, что единица измерения K_{1c} — $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Значение K_{1c} определяют экспериментально на образцах с надрезом и с заранее созданной на дне этого надреза усталостной трещиной. Для расчета K_{1c} при нагружении образца фиксируют усилие в момент подрастания трещины на некоторую длину и перехода ее к нестабильному распространению.

Значение K_{1c} зависит от степени пластической деформации у вершины трещины (ее затуплении) и характеризует сопротивление развитию вязкой трещины. По этой причине критерий K_{1c} называют вязкостью разрушения. Чем значение K_{1c} больше, тем выше сопротивление материала вязкому разрушению и его надежность. Кроме качественной характеристики надежности, K_{1c} дополняет параметры $\sigma_{0,2}$ и E при расчетах на прочность деталей из высокопрочных материалов (сталей $\sigma_b \geq 1200$ МПа, титановых сплавов с $\sigma_b \geq 800$ МПа и алюминиевых сплавов с $\sigma_b \geq 450$ МПа). Этот критерий позволяет определить безопасный размер трещины при известном рабочем напряжении или, наоборот, безопасное напряжение при известном размере дефекта. Например, при рабочем напряжении a_p трещина длиной l будет безопасной для материала II и вызовет разрушение в материале I, имеющем меньшее значение K_{1c} ($K_{1c} I < K_{1c} II$).

Для оценки надежности материала используют также следующие параметры: ударную вязкость KCV и КСТ (ударная вязкость, определенная на образце с V-образным концентратором при комнатной температуре или на образце с усталостной трещиной), температурный порог хладноломкости t_{50} (температура, соответствующая равным долям (50%) хрупких и вязких

участков разрушения в изломе при определении ударной вязкости). Однако это качественные, непригодные для расчета на прочность параметры.

Параметром KCV оценивают пригодность материала для сосудов давления, трубопроводов и других конструкций повышенной надежности.

Параметр КСТ, определяемый на образцах с трещиной усталости у основания надреза, более показателен. Он характеризует работу развития трещины при ударном изгибе и оценивает способность материала тормозить начавшееся разрушение. Если материал имеет $K_{CT} = 0$, то это означает, что процесс его разрушения идет без затраты работы. Такой материал хрупок, эксплуатационно ненадежен. И, наоборот, чем больше параметр КСТ, определенный при рабочей температуре, тем выше надежность материала в условиях эксплуатации. Так же как и K_{Ic} , КСТ учитывают при выборе материала для конструкций особо ответственного назначения (летательных аппаратов, роторов турбин и т.п.).

Порог хладноломкости характеризует влияние снижения температуры на склонность материала к хрупкому разрушению. Его определяют по результатам ударных испытаний образцов с надрезом при понижающейся температуре. Сочетание при таких испытаниях ударного нагружения, надреза и низких температур — основных факторов, способствующих охрупчиванию, важно для оценки поведения материала при экстремальных условиях эксплуатации.

О пригодности материала для работы при заданной температуре судят по температурному запасу вязкости, равному разности температуры эксплуатации и t_{50} . При этом, чем ниже температура перехода в хрупкое состояние по отношению к рабочей температуре, тем больше температурный запас вязкости и выше гарантия от хрупкого разрушения.

Долговечность — свойство материала сопротивляться развитию постепенного разрушения (постепенного отказа), обеспечивая работоспособность деталей в течение заданного времени (ресурса). Постепенный отказ — потеря материалом работоспособности, при

наступлении которой детали заменяют без угрозы аварийных последствий. Причины потери работоспособности (постепенного отказа) разнообразны: развитие процессов усталости, изнашивания, ползучести, коррозии, радиационного разбухания и др. Эти процессы вызывают постепенное накопление необратимых повреждений в материале и его разрушение. 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. Она тем выше, чем ниже скорость зарождения и скорость развития трещины усталости.

Важной характеристикой конструктивной прочности, характеризующей надежность материала, является живучесть при циклическом нагружении. Под живучестью понимают долговечность детали от момента зарождения первой макроскопической трещины усталости размером 0,5—1,0 мм до окончательного разрушения.

Количественно живучесть конструкции оценивается коэффициентом $\beta = 1 - \tau_0 / \tau_{раз}$, где τ_0 и $\tau_{раз}$ — продолжительность эксплуатации конструкции до появления трещин и до разрушения соответственно. Коэффициент живучести может колебаться от 0,1 до 0,9. Раннее зарождение трещин усталости объясняется дефектами металлургического и технологического характера, а также неудачной конструкцией изделия (наличие концентраторов напряжений).

Живучесть имеет особое значение для надежности эксплуатации изделий, безаварийная работа которых поддерживается путем периодического дефектоскопирования различными физическими методами

для выявления усталостных трещин. Чем меньше скорость развития трещины, тем легче ее обнаружить.

Износостойкость характеризует сопротивление материала разрушению поверхности путем отделения его частиц под воздействием силы трения. Износостойкость оценивают величиной, обратной скорости изнашивания.

Долговечность деталей, работающих при высоких температурах (детали энергетических установок, реактивных двигателей), определяется скоростью ползучести— скоростью развития пластической деформации при постоянном (ниже предела текучести) напряжении. Ограничение скорости ползучести достигается применением жаропрочных материалов.

Долговечность деталей, работающих в атмосфере нагретых сухих газов или жидких электролитов, зависит соответственно от скорости химической или электрохимической коррозии. Работоспособность в таких средах сохраняют жаростойкие и коррозионностойкие материалы.

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, массу и размеры деталей;

2) модуль упругости E , который при заданной геометрии детали определяет величину упругих деформаций, т.е. ее жесткость;

3) пластичность δ , ψ , ударная вязкость KCT , KCV , KCU , вязкость разрушения K_{Ic} , порог хладноломкости t_{50} , которые оценивают надежность материала в эксплуатации;

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

6.3. Методы повышения конструкционной прочности

Высокая прочность и долговечность конструкций при минимальной массе и наибольшей надежности достигаются технологическими, металлургическими и конструкторскими методами.

Наибольшую эффективность имеют технологические и металлургические методы, цель которых — повышение механических свойств и качеств материала.

Из механических свойств важнейшее — прочность материала, повышение которой при достаточном запасе пластичности и вязкости ведет к снижению материалоемкости конструкции и в известной степени к повышению ее надежности и долговечности.

Прочность — свойство, зависящее от энергии межатомной связи, структуры и химического состава материала. Энергия межатомного взаимодействия непосредственно определяет характеристики упругих свойств (модули нормальной упругости и сдвига), а также так называемую теоретическую прочность.

Модули нормальной упругости и сдвига являются константами материала и структурно нечувствительны.

Теоретическая прочность (сопротивление разрыву межатомных связей) в реальных кристаллах из-за наличия структурных дефектов не достигается. Реальная прочность на два-три порядка ниже теоретической и определяется не столько межатомными силами связи, сколько структурой материала.

Сопротивление пластической деформации зависит главным образом от легкости перемещения дислокаций. В связи с этим современные методы повышения прочности материала основаны на создании такого структурного состояния, которое обеспечивало бы максимальную задержку (блокировку) дислокаций. К методам упрочнения относятся легирование, пластическая деформация, термическая, термомеханическая и химико-термическая обработка. Повышение прочности указанными методами основано на ряде структурных факторов.

Увеличение плотности дислокаций. Силовые поля вокруг дислокаций являются эффективными барьерами для других близко расположенных дислокаций. В связи с этим, чем больше плотность дислокаций, тем выше сопротивление пластическому деформированию.

Лекция 7. ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ

7.1. Виды разрушения. Классификация всех возможных видов разрушения.

Вид разрушения можно определить как физический процесс или несколько взаимосвязанных между собой процессов, приводящих к разрушению.

Эта система основана на учете трех факторов: характера разрушения, причин разрушения и места разрушения. Подробно эти факторы определяются ниже. Каждый отдельный вид разрушения характеризуется тем, как проявляется разрушение, что его вызывает и где оно происходит. Используя различные комбинации этих факторов, можно указать буквально сотни видов разрушения. Чтобы подробнее пояснить суть этой системы классификации, рассмотрим содержание каждого из этих трех факторов.

По характеру разрушения можно выделить четыре класса (причем некоторые из них могут состоять из подклассов):

1. Упругая деформация.
2. Пластическая деформация.
3. Разрыв, или разделение на части.
4. Изменение материала: (А) металлургическое; (В) химическое; (С) ядерное.

По причинам разрушения можно определить четыре класса:

1. Нагрузки: (А) установившиеся; (В) не установившиеся; (С) циклические; (D) случайные.
2. Время процесса: (А) очень малое; (В) малое; (С) продолжительное.

3. Температуры: (А) низкие; (В) комнатные; (С) повышенные; (D) установившиеся; (Е) неуставившиеся; (F) циклические; (G) случайные.

4. Воздействия окружающей среды: (А) химические; (В) ядерные.

По месту разрушения существует два типа разрушения: (А) объемное; (В) поверхностное.

Для точного описания какого-либо вида разрушения необходимо выбрать характеристики процесса из указанного перечня, не упуская из виду ни одного из трех основных факторов. Например, для описания разрушения в качестве характерного проявления можно выбрать пластическую деформацию, в качестве причин — установившуюся нагрузку и комнатную температуру, а в качестве типа — объемный тип разрушения. Таким образом, указанный вид разрушения можно определить как объемное пластическое деформирование под действием установившейся нагрузки при комнатной температуре. Такой вид разрушения обычно называется течением. Отметим, однако, что термин течение обычно определяет не только указанный вид разрушения: этот термин имеет более общий смысл.

Используя перечисленные классы и подклассы трех основных факторов, определяющих вид разрушения, можно дать определение многих других видов разрушения. Приведенный перечень характеристик процесса разрушения нуждается в дополнительном пояснении и конкретизации, особенно применительно к наиболее опасным видам разрушения.

7.2. Наблюдаемые виды разрушения

В приведенном перечне содержатся все обычно наблюдаемые виды механического разрушения.

1. Упругая деформация, вызванная действием внешних нагрузок и (или) температуры.

2. Текучесть.

3. Бринелирование.

4. Вязкое разрушение.

5. Хрупкое разрушение.

6. Усталость: (A) многоцикловая; (B) малоцикловая; (C) термическая; (D) поверхностная; (E) ударная; (F) коррозионная; (G) фреттинг-усталость.

7. Коррозия: (A) химическая; (B) электрохимическая; (C) щелевая; (D) точечная (питтинговая); (E) межкристаллическая; (F) избирательное выщелачивание; (G) эрозионная; (H) кавитационная; (I) водородное повреждение; (J) биологическая; (K) коррозия под напряжением.

8. Износ: (A) адгезионный; (B) абразивный; (C) коррозионный; (D) поверхностный усталостный; (E) деформационный; (F) ударный; (G) фреттинг-износ.

9. Разрушения при ударе: (A) разрыв при ударе; (B) деформирование при ударе; (C) ударный износ; (D) ударный фреттинг; (E) усталость при ударе.

10. Фреттинг: (A) фреттинг-усталость; (B) фреттинг-износ; (C) фреттинг-коррозия.

11. Ползучесть.

12. Термическая релаксация.

13. Разрыв при кратковременной ползучести.

14. Тепловой удар.

15. Заедание и схватывание.

16. Откол.

17. Радиационное повреждение.

18. Выпучивание.

19. Выпучивание при ползучести.

20. Коррозия под напряжением.

21. Коррозионный износ.

22. Коррозионная усталость.

23. Ползучесть с усталостью.

7.3. Виды механического разрушения

Упругая деформация, вызванная действием внешних нагрузок и (или) температур. Этот вид разрушения имеет место, когда упругая (обратимая) деформация элемента, возникающая при действии эксплуатационных нагрузок и температур, становится настолько большой, что элемент утрачивает способность выполнять предназначенную ему функцию.

Текучесть имеет место, когда пластическая (необратимая) деформация пластичного элемента, возникающая при действии эксплуатационных нагрузок, становится настолько большой, что элемент утрачивает способность выполнять предназначенные ему функции.

Бринелирование, или разрушение вдавливанием, происходит, когда статические усилия в месте контакта криволинейных поверхностей приводят к появлению локальных пластических деформаций у одного или у обоих соприкасающихся элементов, в результате чего происходит необратимое изменение формы поверхности. Например, если шарикоподшипник статически нагружен так, что шарик вдавливается в обойму, пластически деформируя ее, то поверхность обоймы становится волнистой. При дальнейшем использовании подшипника могут возникнуть недопустимые вибрации, шум и перегрев, т. е. налицо его разрушение.

Вязкое разрушение наблюдается, когда пластическая деформация пластичного элемента достигает такой величины, что он разделяется на две части. Разрушение происходит в результате процесса зарождения, слияния и распространения внутренних пор, поверхность разрушения при этом гладкая и волнистая.

Хрупкое разрушение происходит, когда упругая деформация элемента из хрупкого материала достигает такой величины, что разрушаются первичные межатомные связи и элемент разделяется на две или более части. Внутренние дефекты и образующиеся трещины быстро распространяются до полного разрушения; поверхность разрушения при этом неровная, зернистая.

Термин усталость применяется для обозначения разрушения в виде неожиданного внезапного деления детали или элемента машины на две

или более части в результате действия в течение некоторого времени циклических нагрузок или деформаций. Разрушение происходит путем зарождения и распространения трещины, которая после достижения некоторого критического размера становится неустойчивой и быстро увеличивается, вызывая разрушение. Нагрузки и деформации, при которых обычно происходит усталостное разрушение, намного ниже тех, которые приводят к разрушению в статических условиях. Когда величины нагрузок и перемещений таковы, что разрушение происходит более чем через 10 000 циклов, явление обычно называется многоцикловогой усталостью. Когда же величины нагрузок и перемещений таковы, что разрушение происходит менее чем через 10 000 циклов, явление называется малоцикловогой усталостью.

Когда циклические нагрузки и деформации возникают в детали в результате действия циклически меняющегося температурного поля, явление обычно называется термической усталостью. Разрушение, называемое поверхностной усталостью, обычно происходит при наличии вращающихся контактирующих поверхностей. Проявляется оно в виде питтинга, растрескивания и выкрашивания контактирующих поверхностей в результате действия контактных напряжений, под влиянием которых на небольшой глубине у поверхности возникают максимальные по величине циклические касательные напряжения. Эти напряжения приводят к возникновению трещин, которые выходят на поверхность, при этом некоторые частицы материала отделяются. Это явление часто считается разновидностью износа. Ударная усталость, коррозионная усталость и фреттинг-усталость будут описаны ниже.

Коррозия — термин, используемый для обозначения широкого класса видов разрушения, при которых деталь или элемент машины утрачивает способность исполнять свою функцию из-за нежелательной порчи материала в результате химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой. Коррозионное разрушение часто проявляется во

взаимодействии с другими видами разрушения, такими, как износ или усталость. Среди многих типов коррозии отметим следующие. Химическая коррозия представляет собой, по-видимому, наиболее общий тип коррозии вследствие непосредственного контакта поверхности детали с коррозионной средой. Химическая коррозия происходит более или менее равномерно по всей открытой поверхности детали. Электрохимическая коррозия происходит, когда два разнородных металла образуют часть электрической цепи, замыкаемой раствором или пленкой электролита или коррозионной средой.

Щелевая коррозия — в значительной степени локализованный быстропротекающий процесс в щелях, трещинах или стыках, т. е. в местах, где задерживаются малые количества раствора, соприкасающегося с корродирующим металлом. Точечная (питтинговая) коррозия представляет собой локализованные воздействия, в результате которых происходит образование углублений и ямок на поверхности металла. Межкристаллическая коррозия характеризуется локальными воздействиями на границах зерен некоторых медных, хромовых, никелевых, алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов после неправильной термообработки или сварки. Образование локальных гальванических ячеек, в которых осаждаются продукты коррозии, приводит к существенному снижению прочности материала в результате межкристаллической коррозии.

Избирательное выщелачивание представляет собой коррозионный процесс, в результате которого из сплава удаляется какой-либо элемент. Примерами могут служить процессы обесцинкования латуни и графитизации чугуна. Эрозионная коррозия — это быстропротекающий химический процесс, при котором в результате воздействия абразивных веществ или потоков вязких материалов на поверхности материала постоянно в месте контакта с коррозионной средой обнажается свежий незащищенный материал. Кавитационная коррозия наблюдается, когда под влиянием давления пара пузырьки и каверны в жидкости лопаются у поверхности

сосуда давления, в результате чего удаляются частицы материала и открывается доступ коррозионной среде к свежему, незащищенному материалу.

Водородное повреждение, хотя само и не является какой-либо разновидностью коррозии, вызывается ею. К этому виду повреждения относятся насыщение водородом, водородное охрупчивание и обезуглероживание. Биологическая коррозия представляет собой процесс коррозии вследствие активности живых организмов, а именно процессов поглощения ими пищи и выделения отходов. Отходами являются вызывающие коррозию кислоты и гидроокиси. Коррозия под напряжением — очень важная разновидность коррозии.

Износ является нежелательным процессом постепенного изменения размеров вследствие удаления отдельных частиц с контактирующих поверхностей при их движении, обычно скользящем, относительно друг друга. Износ является в основном результатом механического действия. Это сложный процесс, точнее даже ряд различных процессов, которые могут протекать как независимо, так и взаимосвязано. Результатом этих процессов является удаление материала с контактирующих поверхностей вследствие сложного взаимодействия локальных сдвигов, вдавливаний, сваривания материала, разрывов и других механизмов.

Адгезионный износ происходит в результате действия высоких локальных давлений, сваривания между собой шероховатостей поверхностей, последующей пластической деформации, возникающей при их относительном перемещении, разрушения локальных сцеплений шероховатостей, удаления или переноса металла. При абразивном износе частицы удаляются с поверхности в результате режущего или царапающего действия неровностей более твердой из контактирующих поверхностей или твердых частиц, задержавшихся между поверхностями. Когда одновременно возникают условия как для адгезионного, так и для

абразивного износа и коррозии, эти процессы взаимодействуют между собой, и происходит коррозионный износ.

Поверхностный усталостный износ представляет собой изнашивание вращающихся или скользящих относительно друг друга криволинейных поверхностей. При этом в результате действия циклических касательных напряжений на небольшой глубине у поверхности возникают микротрещины, выходящие на поверхность, откалываются макрочастицы материала и на поверхности образуются ямки. Деформационный износ происходит в результате повторного пластического деформирования изнашиваемых поверхностей, приводящего к образованию сетки трещин, при росте и объединении которых образуются частицы износа. Деформационный износ часто наблюдается при действии ударных нагрузок. Ударный износ имеет место при повторном упругом деформировании в процессе действия ударных нагрузок, образовании сетки трещин, которые растут так же, как при поверхностной усталости. Фреттинг-износ описан ниже.

Разрушение при ударе происходит, когда в результате действия неустановившихся нагрузок в детали возникают такие напряжения или деформации, что деталь уже не в состоянии выполнить предназначенную ей функцию. Разрушение происходит в результате взаимодействия волн напряжений и деформаций, являющихся следствием динамического или внезапного приложения нагрузок. Взаимодействие волн может приводить к возникновению локальных напряжений и деформаций, во много раз превышающих возникающие при статическом приложении тех же самых нагрузок. Если величины напряжений и деформаций таковы, что происходит разделение детали на две или более частей, то налицо разрыв при ударе. Если удар приводит к возникновению недопустимых упругих или пластических деформаций, такое разрушение называется деформированием при ударе. Если при повторных ударах возникают циклические упругие деформации, в результате чего появляется сетка усталостных трещин, при росте которых

наблюдается описанное ранее явление поверхностной усталости, то процесс называется ударным износом.

Если в результате малых относительных поперечных смещений двух поверхностей при ударе, которые могут вызываться поперечными деформациями или действием случайных малых боковых составляющих скоростей, происходит фреттинг (подробнее это явление будет описано ниже), то разрушение называется ударным фреттингом. Усталость при ударе наблюдается, когда разрушение происходит при повторном действии ударных нагрузок вследствие образования и распространения усталостных трещин.

Фреттинг может происходить на поверхности контакта двух твердых тел, прижатых друг к другу нормальной силой и совершающих относительно друг друга циклические движения малой амплитуды. Фреттинг обычно имеет место в местах соединений, там, где движения не должно быть, но в результате действия вибрационных нагрузок или деформаций незначительные циклические смещения все-таки есть. Обычно отколовшиеся при фреттинге частицы материала задерживаются между контактирующими поверхностями, поскольку относительные смещения их малы.

Фреттинг-усталость представляет собой преждевременное усталостное разрушение детали машины, на которую действуют циклические нагрузки или деформации в условиях, способствующих фреттингу. Поверхностные повреждения и микротрещины, появляющиеся в результате фреттинга, играют роль зародышей усталостных трещин, в результате роста которых усталостное разрушение происходит при таких нагрузках, которые в других условиях не вызывали бы разрушения. Фреттинг-усталость — очень опасный и коварный вид разрушения, поскольку фреттинг обычно происходит в местах соединений, не доступных для наблюдения, и приводит к преждевременному или даже неожиданному (внезапному) катастрофическому усталостному разрушению.

Фреттинг-износ наблюдается, когда изменения размеров контактирующих деталей в результате фреттинга становятся недопустимо большими или такими, что появляются концентраторы напряжений и локальные напряжения превышают допустимый уровень. Фреттинг-коррозия происходит, когда в результате фреттинга свойства материала детали ухудшаются настолько, что она не может выполнять своих функций.

Разрушение в результате ползучести происходит, когда пластическая деформация элемента машины или конструкции, накопленная в течение некоторого времени действия напряжений и температуры, приводит к изменениям размеров, вследствие которых элемент не может удовлетворительно выполнять предназначенную ему функцию. Процесс ползучести, как правило, можно разделить на три стадии: 1 - неустановившуюся, или первичную, ползучесть, во время которой скорость деформации уменьшается; 2 - установившуюся, или вторичную, ползучесть, во время которой скорость деформации практически постоянна, и 3 - третичную ползучесть, при которой скорость деформации ползучести увеличивается (часто довольно быстро) вплоть до разрушения. Такой вид разрушения часто называется разрывом при ползучести. Произойдет или нет такое разрушение — зависит от характера изменения во времени напряжений и температуры.

Термическая релаксация наблюдается, когда в процессе ползучести, приводящей к релаксации предварительно напряженной или деформированной детали, ее размеры изменяются так, что деталь уже не может выполнять предназначенной ей функции. Например, если предварительно напряженные болты сосуда давления, работающего в условиях высоких температур, релаксируют вследствие ползучести так, что нагрузка от максимального давления превышает предварительную нагрузку и герметичность соединения нарушается, говорят, что болты разрушаются вследствие термической релаксации.

Разрыв при кратковременной ползучести тесно связан с процессом ползучести, однако при этом зависимость напряжений и температуры от времени такова, что элемент разделяется на две части. При этом напряжения и температура, как правило, таковы, что период установившейся ползучести очень непродолжителен или совсем отсутствует.

Тепловой удар происходит, когда градиенты возникающего в детали температурного поля настолько велики, что вследствие перепадов температурных деформаций начинается текучесть или разрушение.

Заедание наблюдается в случае, когда на две скользящие друг по другу поверхности действуют такие нагрузки и температуры, а скорость скольжения, смазка и условия окружающей среды таковы, что в результате значительной пластической деформации шероховатостей поверхностей, их сваривания, отламывания и царапающего действия происходит существенная деструкция поверхности и перенос металла с одной поверхности на другую. Заедание можно считать очень интенсивным процессом адгезионного износа. Когда указанные процессы приводят к значительному ослаблению соединения или, наоборот, к схватыванию, говорят, что соединение разрушается в результате заедания. Схватывание является, по существу, интенсивным процессом заедания, при котором контактирующие детали практически свариваются и их относительное перемещение становится невозможным.

Разрушение отколом происходит, когда от поверхности детали самопроизвольно отделяется часть материала, в результате чего нормальная работоспособность элемента машины утрачивается. Например, бронеплита разрушается в результате откола, когда при ударе снаряда о наружную поверхность бронезащиты в плите возникают волны напряжений, приводящие к отколу с внутренней стороны части материала, которая сама становится смертоносным снарядом. Другим примером разрушения отколом может служить разрушение подшипников качения или зубьев шестерен вследствие описанного ранее явления поверхностной усталости.

Разрушение вследствие радиационного повреждения означает, что при радиационном облучении произошли такие изменения свойств материала, что деталь уже не может выполнить своих функций. Обычно эти изменения связаны с потерей пластичности в результате облучения и служат причиной начала процесса разрушения того или иного вида. Эластомеры и полимеры обычно более подвержены радиационному повреждению, чем металлы, причем прочностные характеристики последних после радиационного облучения иногда улучшаются, хотя пластичность, как правило, уменьшается.

Разрушение выпучиванием наблюдается, когда при некоторой критической комбинации величины и (или) места приложения нагрузки, а также формы и размеров детали ее перемещения или прогибы внезапно резко увеличиваются при малом изменении нагрузки. Такое нелинейное поведение приводит к разрушению выпучиванием, если потерявшая устойчивость деталь уже не может выполнять своих функций.

Разрушение вследствие выпучивания при ползучести происходит, когда по истечении некоторого времени в результате процесса ползучести возникает неустойчивое состояние, т. е. нагрузки и геометрические параметры детали становятся такими, что теряется устойчивость и происходит разрушение.

Разрушение в результате коррозии под напряжением наблюдается, когда действующие напряжения приводят к возникновению локальных поверхностных трещин, располагающихся обычно вдоль границ зерен, в детали, находящейся в коррозионной среде. Часто образование трещин инициирует начало процессов разрушения других видов. Разрушение в результате коррозии под напряжением представляет собой очень опасный вид коррозионного разрушения, поскольку ему подвержены многие металлы. Например, разнообразные чугуны, стали, нержавеющие стали, медные и алюминиевые сплавы подвержены коррозионному растрескиванию под напряжением в некоторых коррозионных средах.

Разрушение вследствие коррозионного износа является сложным видом разрушения, при котором неблагоприятные последствия коррозии и износа приводят совместно к потере работоспособности детали. В процессе коррозии часто образуются твердые абразивные частицы, которые ускоряют изнашивание, а в процессе изнашивания в свою очередь с поверхности постоянно удаляются защитные слои и обнажается свежий металл, что ускоряет коррозию. Взаимное влияние этих процессов друг на друга существенно повышает опасность разрушения.

Коррозионная усталость представляет собой сложный вид разрушения, при котором совместно сказываются неблагоприятные эффекты коррозии и усталости, приводящие к разрушению. В процессе коррозии на поверхности металла часто образуются ямки, служащие концентраторами напряжений. В результате концентрации напряжений процесс усталостного разрушения ускоряется. Кроме того, трещины в хрупком слое продуктов коррозии служат зародышами усталостных трещин, распространяющихся в основной металл. С другой стороны, в результате действия циклических напряжений или деформаций происходит растрескивание и отслаивание продуктов коррозии, т. е. открывается доступ коррозионной среде к свежему металлу. Таким образом, оба процесса ускоряют друг друга, и опасность разрушения может быть очень большой.

Разрушение вследствие ползучести с усталостью является видом разрушения, происходящего в условиях, вызывающих одновременно и усталость, и ползучесть.

Лекция 8. УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Стойкость металлов против усталостного разрушения является одним из важных факторов, влияющих на надежность и долговечность машин. Явление усталостного разрушения деталей связано с пластической

деформацией, при которой происходит реализация различных механизмов взаимодействия дислокаций, скопление вакансий и зарождение усталостной трещины.

В этом сложном процессе большую роль играют адсорбция, диффузии, коррозия. Процесс усталостного разрушения усложняется при одновременном циклическом нагружении и нагружении трением в условиях воздействия внешней газовой и жидкой сред. В таких условиях работает большинство деталей машин.

Установлено, что многократное приложение нагрузок вызывает разрушение деталей машин и элементов конструкций при напряжениях, значительно меньших, чем в случае однократного их нагружения. При большом числе повторных нагружении напряжения, при которых происходит разрушение, могут быть ниже не только предела прочности и предела текучести, но и предела упругости. Это явление было названо усталостью металлов.

Внешним проявлением усталости металлов является возникновение и распространение при многократных нагрузках характерного вида трещин на поверхности изделий в тех местах, где имеются следы обработки инструментом, переходы от одного сечения к другому или другие концентраторы напряжений. Трещины усталости появляются не сразу, а постепенно. Сначала в металле накапливаются необратимые изменения, приводящие к возникновению микроскопических трещин, а затем происходит постепенное увеличение и углубление их внутрь изделия по его сечению, пока ослабление последнего не приводит к завершающему хрупкому разрушению металла.

Многолетние исследования усталостных повреждений позволили сделать вывод, что усталость охватывает две значительно отличающиеся друг от друга области циклического нагружения и деформирования, в каждой из которых разрушение является следствием действия различных физических механизмов. Одна из этих областей — циклическое нагружение, при котором

во время каждого цикла возникают значительные пластические деформации. Эта область характеризуется большими по величине нагрузками и малыми долговечностями, т. е. небольшим числом циклов до усталостного разрушения. Обычно эта область называется малоцикловою усталостью.

Другая область — циклическое нагружение, при котором деформация во время каждого цикла в значительной степени упруга. Для этой области характерны малые нагрузки и большие долговечности, т. е. большое число циклов до разрушения. Эта область обычно называется многоцикловою усталостью. Малоцикловая усталость обычно ассоциируется с областью, для которой число циклов до разрушения не превышает 10^4 — 10^5 , а многоцикловая усталость с областью, которая характеризуется долговечностью более 10^4 — 10^5 циклов.

Повторно-переменные нагружения по своему характеру могут быть разнообразными. Различают следующие виды циклов напряжения: знакопеременный симметричный цикл, знакопеременный асимметричный, пульсирующий, знакопостоянный. Цикл напряжений характеризуется максимальным напряжением σ_{\max} , минимальным σ_{\min} , амплитудой, средним напряжением и коэффициентом асимметрии цикла.

Основным критерием, характеризующим сопротивление металла усталостному разрушению, является предел выносливости (предел усталости), который для знакопеременного симметричного цикла обозначается σ_{-1} .

Под пределом выносливости при данном R подразумевается то наибольшее напряжение цикла σ_{\max} , которое может выдержать металл образца без разрушения от усталости при неограниченном числе циклов нагрузки.

При испытаниях обычно принимают заданное число перемен нагрузки (база), которое не должно вызывать усталостного разрушения. Базу устанавливают в зависимости от программы испытаний и служебного назначения испытываемого металла.

Вторым критерием, которым можно характеризовать стойкость металла против усталости, является долговечность. Долговечность N — это число циклов напряжения, при котором происходит разрушение в данных условиях испытания. Испытание на выносливость заключается в установлении зависимости σ_{\max} от соответствующей долговечности N . Кривую выносливости (долговечности) строят по данным, полученным при испытаниях.

Существует несколько способов построения кривых выносливости (долговечности). Чаще всего их строят в координатах $\sigma_{\max} — \lg N$ и $\sigma_{\max} — N$.

В настоящее время в литературе описано много методов усталостных испытаний, которые используют для построения кривых выносливости.

Методика усталостных испытаний включается в следующем. Из испытуемого металла изготавливают серию стандартных образцов (10—12 штук), которые подвергают испытанию на специальных машинах. Величину напряжения и число нагружений, при которых ломаются образцы, наносят на координатную систему с осями напряжение σ — число циклов нагружений N . При испытании последующего образца напряжение уменьшают. В результате многократного повторения испытаний образуется система точек, соединив которые получают кривую выносливости.

Для стали кривая выносливости, полученная при испытании в сухом воздухе, приблизительно после 1—2 млн. циклов нагружений становится почти горизонтальной, т. е. коэффициент K_0 приближается к 1. Поэтому при определении предела выносливости обычно ограничиваются 6—10 млн. циклов нагружений.

Кривые выносливости цветных металлов медленно приближаются к горизонтальному участку, поэтому нельзя определить их истинный предел выносливости. За условный предел выносливости в этих случаях принимают то циклическое напряжение, которое выдерживает образец, не разрушаясь при условном числе циклов N , обычно равном $(50 \dots 100) \cdot 10^6$.

Кривая повреждаемости показывает связь между числом циклов и напряжениями, при которых разрушения металла еще нет, но уже происходят необратимые изменения его свойств и появляются первые усталостные трещины.

Усталостный излом имеет две резко отличных друг от друга зоны. Первая — чрезвычайно мелкозернистая (фарфоровидная), имеющая гладкую, как бы притертую поверхность и характерные концентрические линии,— является зоной постепенного разрушения от усталости. Вторая зона, имеющая обычное кристаллическое строение и напоминающая хрупкий излом при статическом разрушении, является зоной мгновенного заключительного разрушения. Чаще всего образование очагов разрушения начинается с поверхности циклически нагруженной детали.

8.1. Влияние внешних механических воздействий на усталость

Результаты исследования процесса выносливости металла в воздухе показали, что предел выносливости практически не зависит от закона изменения напряжений в течение одного цикла и частоты изменения циклов до 1000 Гц. В основном на предел выносливости оказывает влияние вид напряженного состояния, величина и знак максимального и минимального нагружения и степень асимметрии цикла.

Влияние асимметрии цикла характеризуется диаграммой предельных напряжений (полной диаграммой выносливости).

8.2. Некоторые теории усталости и модель процесса разрушения при усталости

В настоящее время еще не существует единой общепризнанной теории усталостного разрушения, построенной на представлениях о физических процессах, сопровождающих это явление. Многие исследователи объясняют это тем, что в зависимости от структурного состояния материала и условий

циклического нагружения возникают и действуют различные механизмы зарождения и развития усталостных трещин.

Применение теории несовершенств кристаллического строения реального металла к изучению процесса разрушения металла в условиях циклического нагружения позволило более близко подойти к раскрытию физической природы усталостного разрушения.

Несмотря на то, что в настоящее время еще не установлена единая точка зрения на явление усталости, применение теории дислокаций при изучении усталостного разрушения существенно помогает раскрыть природу этого явления. Факторами, определяющими закономерность разрушения при усталости, являются возвратно-поступательные движения дислокаций и их взаимодействия между собой и другими дефектами кристаллической решетки. Возникающие при этом эффекты аннигиляции дислокаций, возникновение вакансий, локальное повышение напряжений и температуры способствуют зарождению трещин.

Движение дислокаций и реализация различных механизмов их взаимодействия приводит к образованию большого количества вакансий. Последующая коагуляция вакансий в процессе циклического изменения напряжений обуславливает образование их колоний, которые представляют собой зародыши трещин. Дальнейшее развитие усталостных трещин происходит за счет осаждения вакансий на поверхностях этих трещин, которое заканчивается в конечном итоге усталостным разрушением металла. Таким образом, усталостное разрушение имеет двойственный характер. С одной стороны, оно сопровождается осаждением вакансий на поверхностях микротрещин в плоскостях максимальных нормальных напряжений, а с другой,— коагуляцией вакансий в плоскостях максимальных касательных напряжений.

Развитие процесса разрушения металла при усталости можно разделить на несколько периодов.

В первом периоде (инкубационном) происходит накопление пластической деформации и упрочнение материала в результате скопления дислокаций перед препятствиями, в основном у приповерхностных слоев. Таким образом можно считать, что первой стадией процесса усталости является активизация источников дислокаций. Указанные процессы преимущественно протекают при высоких напряжениях. Релаксация локальных напряжений в приповерхностном слое приводит к образованию большого числа вакансий. Образование во время инкубационного периода полосы скольжения также способствует накоплению вакансий. Второй период характеризуется образованием микротрещин, развитие которых до критических размеров происходит в третьем периоде. Последний, четвертый, период развития процесса усталости наступает с момента достижения трещиной критических размеров и продолжается до хрупкого разрушения металла.

На основании существования единой зависимости времени, протекающего до разрушения, от величины растягивающего напряжения и температуры можно сделать вывод о том, что наличие этой единой зависимости прочности твердых тел указывает на общие закономерности пластической деформации и разрушения независимо от условий деформации и вида разрушения — вязкого, хрупкого или усталостного.

При циклическом деформировании интенсивность процесса генерирования дислокаций, их движение, коагуляция и аннигиляция вакансий происходят более интенсивно, поскольку скорость протекания локальных пластических деформаций на несколько порядков выше скорости пластической деформации при статическом нагружении.

В существующих дислокационных теориях предлагается несколько схем образования трещин, но во всех этих теориях главные дислокационные механизмы зарождения, развития трещины и разрушения металла основаны на процессе скопления дислокаций у препятствий.

При использовании существующей аналогии между процессами поглощения энергии кристаллической решеткой при механическом нагружении до разрушения и нагреве металла до состояния полного расплавления, была построена структурно-энергетическая теория усталости металлов. В этой теории явление усталости связывается с развитием в локальных объемах металла двух основных процессов: накопления неупругих искажений кристаллической решетки до критической величины и нарушения межатомных связей в объемах металла с предельно искаженной кристаллической решеткой.

8.3. Влияние качества поверхности на усталость

Теоретически и экспериментально установлено, что почти во всех случаях процесс усталостного разрушения начинается с поверхности. Это объясняется тем, что металл поверхностного слоя может находиться в неблагоприятных условиях нагружения, например, напряжения на поверхности могут достигать наивысших значений (даже при условии некоторого изгиба деталей, номинально нагруженных по оси). Изменение сечения детали, повреждения и шероховатость поверхности вызывают местную концентрацию напряжений, достигающую наивысших значений на поверхности. В поверхностном слое при воздействии поверхностно-активных и коррозионных сред зарождаются и развиваются критические трещины усталости. В связи с этим становится очевидным, что от качества поверхности зависит интенсивность процесса усталостного разрушения металла.

В результате исследований было установлено, что кислород и другие газы, вступающие в соединение с испытуемым металлом, увеличивают скорость распространения трещин, в результате чего снижается долговечность образцов, а поэтому почти всякое усталостное испытание представляет собою испытание на коррозионную усталость.

Процесс коррозионной усталости, протекающий в жидкой химически активной среде, обладающей свойствами электролита, значительно сложнее процесса, протекающего в газовой среде, так как в этом случае, кроме химических процессов, наблюдаются и электрохимические. При наличии коррозионно-агрессивной среды одновременно протекают электрохимические процессы коррозии и циклического деформирования металла. Этим процессам предшествует адсорбция из коррозионной среды (ионов либо целых молекул) на поверхности металла, вызывая явление адсорбционной усталости. При высоких амплитудах нагружения в кислых средах происходит процесс наводораживания катодных участков пол и кристаллического металла, вызывая их охрупчевание и разрушение. Коррозионная усталость сопровождается протеканием коррозионных процессов, среди которых основную роль играет адсорбция, способствующая росту числа сдвигов, что в конечном итоге приводит к образованию усталостных микротрещин. При дальнейшем развитии усталостного разрушения адсорбционные явления уступают место чисто коррозионным явлениям, происходящим внутри сдвигов или внутри уже возникших трещин усталости, в которых происходит снижение электродного потенциала под влиянием концентрации напряжений и разрушения действующими напряжениями пассивирующих пленок окислов. Этот процесс, в свою очередь, способствует росту трещин усталости вследствие расклинивающего действия продуктов коррозии, имеющих больший объем, чем объем металла, из которого они образовались. Увеличение числа пачек скольжения под влиянием адсорбционного эффекта является причиной преимущественного образования внутрикристаллических трещин при коррозионной усталости.

К факторам, влияющим на интенсивность снижения выносливости при коррозионной усталости, относятся: химический состав стали, ее механическая и термическая обработка, свойства коррозионной среды, напряженное состояние и частота приложения нагружения.

Результаты исследований показали, что при увеличении твердости и прочности стойкость стали против коррозионной усталости снижается. Более устойчивыми к коррозионной усталости являются коррозионностойкие стали. Термическая обработка (закалка на мартенсит с последующим отпуском на троостит и сорбит) увеличивает стойкость против коррозионной усталости, причем это увеличение особенно заметно после закалки ТВЧ.

Отрицательное влияние коррозионной среды увеличивается по мере роста ее агрессивности.

В растворах электролитов интенсивность снижения выносливости больше, чем в чистой воде. Общая же коррозия (потеря в весе) часто не зависит от агрессивности среды вследствие образования пассивирующей защитной пленки, которая при циклическом нагружении разрушается и не предохраняет от протекания коррозионно-усталостного процесса.

Вид напряженного состояния и частота изменения напряжения главным образом проявляются при нулевых циклах. Так, например, выносливость стали в воздухе и в воде почти одинакова при пульсирующем сжатии и сильно снижается при пульсирующем растяжении в воде.

Это позволяет утверждать, что качество поверхности является важным фактором, с помощью которого можно добиваться изменения предела выносливости деталей машин.

Результаты многочисленных исследований влияния качества поверхности на стойкость металлов против усталости показали, что механическая обработка, различные виды поверхностного упрочнения, при которых происходит изменение шероховатости поверхности и изменение напряженного состояния поверхностного слоя металла, в большой степени влияют на предел выносливости. Снижение шероховатости поверхности и повышение механических свойств (наклеп), в результате возникновения в поверхностном слое деталей собственных напряжений сжатия, повышает предел выносливости от 20 до 100% и более.

Степень шероховатости зависит от вида и режима механической обработки. Предел выносливости снижается при повышении шероховатости и предела прочности стали.

Влияние микрогеометрии (шероховатости) на выносливость стали связано с чувствительностью ее к концентрации напряжений, поэтому в более прочных и мелкозернистых сталях влияние микрогеометрии проявляется сильнее, чем в мягких, пластичных сталях или в материалах с большой внутренней неоднородностью, например в чугунах, которые малочувствительны к качеству обработки поверхности.

Повышение стойкости против усталости пластичных материалов в значительной степени зависит от прочности поверхностного слоя в результате наклепа при механической обработке. Для повышения стойкости против усталости твердых и хрупких материалов положительное влияние оказывают остаточные напряжения, способные изменять асимметрию цикла.

Трудно исследовать влияние микрогеометрического параметра поверхности (шероховатость) на стойкость металла против усталостного разрушения отдельно от влияния характеристики упрочнения и напряженного состояния поверхностного слоя. При сопоставлении данных шероховатости поверхности с пределом выносливости было сделано заключение о том, что между значением шероховатости поверхности и пределом выносливости существует простая экспоненциальная зависимость. Однако на предел усталости влияют и другие факторы, определяющие качество поверхности. Технологически можно получить поверхность с одинаковой величиной шероховатости, но с различными степенями упрочнения структуры и напряженностью поверхностного слоя. Так, например, при шлифовании получают шероховатость поверхности $R_z=2...2,5$ мкм, такую же шероховатость можно получить при точении. Одинаковая шероховатость может быть получена при механической и электролитической полировке. Однако стойкость против усталости в этих случаях будет различная, так как усталостная прочность зависит от шероховатости,

механических свойств, напряженного состояния поверхностного слоя, которые являются результатом обработки поверхности.

Усталостная прочность шлифованных деталей, работающих в воздушной среде, меньше по сравнению с усталостной прочностью полированных. Это объясняется появлением в результате шлифования значительных остаточных напряжений растяжения. Однако различные способы шлифования в различной степени влияют на усталостную прочность стали. При тонком шлифовании в продольном направлении предел выносливости при изгибе не изменяется, а при грубом — понижается на 20...25%. Чем выше класс чистоты поверхности, меньше концентраторов напряжений и больше величина остаточных сжимающих напряжений, интенсивность и глубина наклепа, тем выше выносливость стали в воздухе.

8.4. Коррозионная усталость

Коррозионная усталость — это процесс разрушения металла при одновременном воздействии многократного (циклического) деформирования и химически агрессивных сред.

При коррозионной усталости так же, как и при усталости, трещины появляются в поверхностном слое детали и постепенно распространяются вглубь, приводя к уменьшению несущего сечения. Процесс заканчивается быстрым разрушением оставшегося сечения детали от механических напряжений. На изломе от коррозионной усталости обычно различают две зоны: усталостную (с участием коррозии) и зону долома.

Коррозионная усталость зависит не только от структуры металла, полученной в результате термической обработки, но и от структуры и состояния поверхностного слоя, образующегося при других способах поверхностного упрочнения. Нанесение на металлические детали тонких слоев покрытия из высокополимерных материалов (капрона, эпоксидной смолы и т. д.) позволяет получить в 3%-ном растворе NaCl коррозионно-усталостную прочность, равную усталостной прочности в воздушной среде.

Эффективным средством защиты от коррозии в морской воде являются комбинированные металло-полимерные покрытия: сначала плазменное напыление, например алюминием, а затем нанесение слоя высокополимерного материала.

8.5. Адсорбционная усталость

Адсорбционная усталость — это процесс разрушения металла при одновременном воздействии многократного (циклического) деформирования и адсорбирующихся поверхностно-активных веществ.

Циклическое нагружение стали в растворе поверхностно-активного вещества существенно снижает ее выносливость по сравнению с неактивной средой. В результате действия поверхностно-активной среды может наблюдаться как снижение, так и повышение усталостной прочности стали, что зависит от величины циклической перегрузки, определяющей механизм зарождения трещин усталости и проявления действия внешнего или внутреннего адсорбционного эффекта.

Значительные скорости миграции адсорбированных молекул определяют независимость адсорбционных факторов снижения выносливости от времени пребывания металла в среде, содержащей поверхностно-активные вещества, что, в свою очередь, обуславливает форму кривой адсорбционной усталости. Здесь необходимо подчеркнуть то обстоятельство, что для сравнения в качестве неактивной среды в этих исследованиях был принят воздух, обладающий значительным коррозионным действием. Причем, интенсивность коррозионного воздействия кислорода, находящегося в воздухе, может быть больше интенсивности адсорбционного понижения прочности.

Несмотря на специфические особенности разрушения металла при циклическом деформировании, многие положения адсорбционного влияния поверхностно-активных сред при статическом нагружении можно использовать и для объяснения причин усталостного разрушения. В условиях

одновременного действия напряжений, способствующих развитию дефектов кристаллической решетки металла, и наличия физически адсорбирующихся поверхностно-активных веществ происходит адсорбционное пластифицирование (облегчение пластической деформации) и адсорбционное понижение прочности (возникновение хрупкого разрушения при малых интенсивностях напряженного состояния, вплоть до самопроизвольного диспергирования).

Различают внешний и внутренний адсорбционные эффекты Ребиндера. Внешний адсорбционный эффект возникает в процессе адсорбции поверхностно-активных веществ (ПАВ) на внешней поверхности деформируемого твердого тела и приводит к его пластифицированию, т. е. к снижению предела текучести и коэффициента упрочнения. При таком действии адсорбционных поверхностных слоев всегда наблюдается значительное измельчение пачек скольжения и зеренной структуры деформируемого металла.

Внутренний адсорбционный эффект возникает в процессе адсорбции на внутренних поверхностях раздела — зародышевых микротрещинах разрушения, возникающих в процессе деформации твердого тела. Это приводит к снижению работы, которая затрачивается на образование новых поверхностей и к облегчению развития микротрещин, что проявляется в повышении хрупкости и резусом снижении прочности.

В основе внешнего адсорбционного эффекта лежит чисто поверхностное взаимодействие материала со средой, поскольку диффузия органических молекул ПАВ в решетку металла невозможна. В результате обратимой адсорбции происходит снижение свободной энергии поверхности. Эффект пластифицирующего действия наблюдается в определенной области скоростей деформирования.

Снижение предела выносливости под влиянием поверхностно-активной среды зависит от природы и концентрации ПАВ, свойств растворителя, частоты изменений напряжений, физического состояния поверхности и

поверхностных слоев металла. Было установлено, что при адсорбции из неполярных углеродистых растворителей снижение предела усталости достигает меньших значений, чем при адсорбции из полярных растворителей. Снижение предела выносливости увеличивается с увеличением степени активности растворенного ПАВ и растворителя, а также с уменьшением частоты изменения напряжения. С возникновением остаточных растягивающих напряжений в поверхностном слое стали адсорбционный эффект снижения выносливости увеличился в три раза, а появление остаточных напряжений сжатия устранило снижение выносливости в поверхностно-активной среде. Эти исследования были проведены на стальных образцах (сталь 20Х, 40Х) в активированном 2% олеиновой кислотой масле МС-14. Остаточные напряжения растяжения создавались путем электролитического никелирования образцов, а остаточные сжимающие напряжения — накаткой поверхности образцов роликами.

Адсорбционный эффект снижения выносливости проявляется при очень малых концентрациях ПАВ в неактивных растворителях. Так, например, адсорбционный эффект достигает максимума при добавлении к неактивному вазелиновому маслу 0,1% поверхностно-активного, но химически нейтрального цетилового спирта.

Промышленные смазочные масла снижают предел выносливости по сравнению с пределом выносливости, установленным при испытаниях в воздушной среде, на 5... 10%, а при введении в их состав нескольких процентов поверхностно-активных добавок (жирных кислот) снижение предела выносливости может достигать 20%.

Важным фактором в процессе адсорбционного взаимодействия ПАВ с поверхностью металла является газовая среда. Наличие кислорода в газовой среде обуславливает образование окисных пленок, играющих экранирующую роль по отношению к действию ПАВ. Существующие окисные пленки и пленки, образующиеся на поверхностях, развивающихся

при циклических нагружениях трещин усталости, значительно снижают адсорбционный эффект ПАВ.

8.6. Особенности усталостного разрушения металлов при одновременном циклическом нагружении и нагружении трением

Процесс усталостного разрушения, начинающийся с поверхностного слоя, в большой степени зависит от состояния и свойств вторичной структуры в том случае, если деталь в условиях работы воспринимает циклические нагрузки, а ее поверхность — нагрузку трением. В таких условиях работают многие детали реальных машин и механизмов. Для повышения долговечности и надежности деталей необходимо при конструировании учитывать влияние трения и вызываемого им процесса изнашивания на протекание усталостного разрушения.

От условий трения зависят качество поверхности, фазовый состав, свойства, напряженное состояние вторичных структур поверхностных слоев и вид протекающего процесса изнашивания трущейся пары. Таким образом, условия трения определяют не только износостойкость, но и усталостную прочность материала. Следовательно, разработку различных технологических мероприятий для повышения долговечности машин надо осуществлять при комплексном учете обоих факторов.

Известно, что все методы поверхностного упрочнения, которые способствуют повышению механических характеристик поверхностного слоя, при отсутствии концентраторов напряжений повышают усталостную прочность стали. Аналогичное действие оказывает упрочнение поверхностного слоя, возникающее под воздействием сил трения. Естественно, это имеет место при таких видах изнашивания, когда не наблюдается следов повреждаемости поверхностей трения, которые могут играть роль концентраторов напряжений.

Особенность влияния процесса трения и изнашивания на усталостную прочность стали заключается в том, что еще в момент приработки происходит изменение чистоты поверхности и формирование вместо поверхностного слоя, образовавшегося в процессе механической обработки, качественно нового поверхностного слоя, определяющего влияние качества поверхности на усталостную прочность стали.

Предел усталости и долговечность материалов при одновременном воздействии сил трения и повторно-переменных нагрузок зависит от скорости скольжения контактирующих поверхностей, нормальной нагрузки, определяющей величину силы трения и окружающей среды.

Влияние скорости скольжения связано, главным образом, с изменением свойств поверхностного слоя в процессе трения в результате развития различных видов изнашивания (схватывания I рода, нормального окислительного изнашивания и теплового изнашивания) при изменении скорости скольжения. Нормальная нагрузка оказывает влияние аналогичное скорости, хотя и в меньшей степени.

Большой интерес представляют исследования влияния различных видов изнашивания на процесс усталостного разрушения, как при неодновременном, так и при одновременном протекании этих процессов. Проведенные испытания на усталостную прочность образцов из стали 45, предварительно подвергавшихся трению на режимах, вызывавших различные виды изнашивания, показали, что наиболее опасным с точки зрения усталостной прочности является схватывание I рода. Предел усталости нормализованных образцов снизился на 7,7, а закаленных и отпущенных — на 48,4%. Основной причиной понижения выносливости образцов, работавших на режиме схватывания I рода, является концентрация напряжений, вызванная глубинными вырывами, надрезами и микротрещинами. Различная степень снижения усталостной прочности образцов из нормализованной и отпущенной стали, очевидно, связана с различным качеством поверхности и вторичных структур, образовавшихся

при трении, и разной чувствительностью стали к концентраторам напряжений. После удаления очагов схватывания усталостные характеристики образцов восстанавливаются полностью.

Влияние абразивного вида изнашивания на снижение усталостной прочности было исследовано на образцах с единичными царапинами глубиной и радиусом у вершины, равными 6 мкм. В связи с тем, что для усталостной прочности деталей групповые царапины менее опасны, чем единичные, снижение предела усталости образцов с абразивным микронадрезом незначительно.

Результаты испытаний образцов, подвергавшихся нормальному окислительному изнашиванию и начальной стадии теплового изнашивания, показали, что предел усталости нормализованных образцов после окислительного изнашивания увеличился на 16, а после теплового — на 19%; закаленных и отпущенных — повысился соответственно на 7,2 и 11,5%.

Положительное влияние окислительного и теплового видов изнашивания на предел усталости объясняется повышением чистоты поверхностей трения, упрочнением поверхностного слоя и возникновением остаточных сжимающих напряжений, причем, у образцов, подвергавшихся тепловому изнашиванию, распространение пластической деформации было обнаружено на большей глубине.

В деталях реальных машин процессы, связанные с трением, износом и усталостным разрушением, протекают одновременно, поэтому сведения о возможных изменениях усталостных характеристик при износе в процессе повторно-переменных нагрузок представляют особый интерес. В результате проведенных исследований установлено, что при трении без смазки на режиме окислительного изнашивания при одновременном воздействии сил трения в течение всего периода циклического нагружения наблюдается значительное повышение предела выносливости по сравнению с испытаниями без приложения нагрузок трением. При трении образцов из

нормализованной стали 45 о латунный вкладыш предел выносливости повысился на 12, а при накатке роликом — на 21%.

Положительное влияние на изменение предела выносливости стали при окислительном изнашивании оказывает предварительная приработка в ненапряженном состоянии. Это обусловлено упрочнением поверхностного слоя, степень которого зависит от режима приработки. Так, например, приработка без смазки образцов из стали 45 в паре с бронзовыми вкладышами при нормальном давлении 1,0 МПа в течение 0,5; 1 и 1,5 ч приводит к повышению предела выносливости образцов соответственно на 9; 21 и 15%.

При трении в условиях одновременного протекания процессов схватывания и действия повторно-переменных нагрузок наблюдается резкое снижение долговечности и предела выносливости вследствие возникновения на поверхностях трения очагов повреждаемости. Долговечность шлифованных образцов снижается в 5...6, а полированных — в 15...20 раз.

Влияние нормального давления при трении на долговечность стали было исследовано в различных газовых средах на специальной оригинальной установке. Образцы для испытания изготавливали из нормализованной стали 45 с концентратором напряжений в виде кольцевого надреза. Образцы закрепляли в испытательной машине консольно и испытывали на усталость изгибом при вращении и трении. Образец нагружался трением в месте ожидаемого разрушения от циклической нагрузки — в надрезе, причем с той стороны образца, где действовали циклические растягивающие напряжения.

8.7. Роль оксидных пленок при адсорбционной усталости металла

Детали реальных машин, работающие в сложных условиях циклического нагружения в различных газовых и смазочных средах, подвержены адсорбционной усталости. Адсорбционная усталость значительно усложняется, если детали машин воспринимают при работе еще и нагрузку трением.

Усталостная прочность таких деталей зависит от свойств и состояния вторичных структур, формирующихся на поверхностях трения под воздействием пластической деформации и среды, заполняющей зону трения.

Пленки химически адсорбированного кислорода всегда присутствуют на поверхности металла, если детали машин работают в среде воздуха. Пленки иной природы могут образовываться в процессе работы деталей машин в условиях специально созданной среды, например, при введении определенных веществ в смазочное масло. Среди таких веществ, в первую очередь, большой интерес представляет йод, энергично взаимодействующий с металлом и образующий йодидные пленки.

Было установлено, что при трении и износе образующиеся окисные пленки резко снижают эффективность действия ПАВ, содержащихся в смазочном масле, и поэтому эффект Ребиндера проявляется в малой степени.

Есть все основания предполагать, что в процессе адсорбционной усталости как при работе деталей без приложения нагрузки трением, так и при работе с нагрузкой трением химически адсорбированные пленки также должны оказывать экранирующее действие по отношению к ПАВ.

С целью подтверждения этого предположения и исследования закономерностей влияния химически адсорбированных пленок различной природы на взаимодействие ПАВ с поверхностью металла в процессе адсорбционной усталости было проведено испытание образцов на усталость с двумя типами химически адсорбированных пленок: окисной и йодидной.

Сначала было проведено обычное испытание образцов на усталость в воздушной среде без приложения нагрузки трением и испытание в таких же условиях, но с дополнительной подачей в зону вероятного излома образца химически чистого нейтрального вазелинового масла. Затем было проведено несколько серий испытаний на адсорбционную усталость в различных газовых и жидких средах.

Анализ результатов испытаний показал, что наиболее низкую долговечность сталь 45 проявляет при обычных испытаниях образцов на

усталость в воздушной среде без приложения нагрузки трением. Это объясняется коррозионным действием кислорода, находящегося в воздухе, атомы которого, химически адсорбируясь на ювенильных поверхностях металла, возникающих в результате сдвигов в плоскостях скольжения, образуют мономолекулярный окисный слой. Этот слой на различных этапах усталостного разрушения затягивается внутрь кристалла. При этом часть атомов кислорода транспортируется вглубь металла по активным полосам скольжения, создавая препятствия движению дислокаций и способствуя их скоплению до критической плотности. При достижении плотности дислокаций $100... 1000 \text{ 1/T м}^2$ слои охрупчиваются и в них зарождаются субмикротрещины, способствующие более быстрому усталостному разрушению.

Наиболее высокую усталостную прочность сталь 45 проявляет при испытании образцов в среде нейтрального (инактивного) вазелинового масла вследствие образования масляной пленки, изолирующей поверхность металла от действия кислорода, находящегося в воздухе. Растворенный в вазелиновом масле кислород оказывает значительно меньшее коррозионное действие.

Введение в вазелиновое масло ПАВ приводит к адсорбционному понижению усталостной прочности стали. Поверхностно-активная среда, возбуждая источники генерирования дислокаций, способствует локальному росту не только касательных, но и нормальных напряжений на границах зерен, что приводит к образованию и развитию микротрещин. После выхода трещин на поверхность по ним начинает мигрировать поверхностно-активная среда, облегчая разрядку дислокаций по внутренним поверхностям раздела и активируя внутренние источники дислокаций.

Результаты проведенных исследований показали, что интенсивность процесса адсорбционного понижения усталостной прочности стали зависит от наличия на поверхности окисных или каких-либо других химически адсорбционных пленок или пленок вторичных структур, образующихся в

процессе трения. Все эти пленки играют роль экрана по отношению к действию поверхностно-активных веществ.

Таким образом, одним из путей эффективного повышения долговечности, надежности, снижения веса деталей машин в случае работы их в условиях совместного нагружения циклической нагрузкой и трением является оптимизация сочетания газовой среды, смазки, скорости скольжения и давления в зоне трения.

Лекция 9. Конструктивные и эксплуатационные методы повышения износостойкости деталей машин

9.1 Конструктивные методы повышения износостойкости

Развитие конструкции машин происходит при постоянном стремлении к увеличению их производительности, что почти всегда сопровождается повышением механической и тепловой нагрузок подвижных сопряжений деталей. В связи с этим перед конструктором стоит задача создания новых, более современных узлов трения. В конструктивную разработку узлов трения входят:

- оценка и выбор принципиальной схемы работы узлов трения с точки зрения их влияния на износостойкость и надежность машин в целом;
- выбор материалов и сочетание их в парах трения;
- назначение размеров и конфигураций деталей с учетом местной и общей прочности;
- разработка мер по уменьшению общих и местных перегрузок;
- обеспечение нормального функционирования узлов трения в заданных условиях с помощью смазочной системы, защиты от загрязняющего действия среды, блуждающих токов и перегрева от посторонних источников тепла, воздействующих на узел в процессе работы;
- обеспечение эксплуатационной технологичности конструкции;

- защита трущихся поверхностей деталей и узлов от возможных аварийных повреждений при эксплуатации;
- разработка средств диагностирования узлов трения.

Выбор материалов для трущихся деталей

Трущиеся детали в зависимости от назначения изготавливают из конструкционных, фрикционных, износостойких и антифрикционных материалов обширной номенклатуры. Во многих случаях на конструкционный материал наносят износостойкие покрытия, пленки и др. Из конструкционных сталей делают детали, которые должны отвечать требованиям высокой прочности, жесткости или податливости, а также иметь поверхности трения: детали типа валов, пальцев, болтов, зубчатых колес, силовых цилиндров, поршней и т.д.

Фрикционные материалы - это материалы, которые в контакте с металлической поверхностью имеют высокий, более или менее стабильный коэффициент трения. Материалы разделяются на органические (дерево, пробка, войлок), металлические (чугун, стали У6, У7, марганцевая сталь и др.), асбестокаучуковые, пластмассовые (текстолит, асбестотекстолит, фибра), спеченные из медной и железных основ.

Износостойкие - материалы, которые при трении даже в тяжелых условиях нагружения сравнительно мало изнашиваются. Конструкции: плунжерные пары, зубья ковшей экскаваторов, лемеха плугов и др.

Материалы: конструкционные стали, упрочненные по всему объему или по рабочим поверхностям, специальные стали, чугуны, спеченные металлы, резина, пластмасса и др.

Антифрикционные - подшипниковый материал, как металлический, так и неметаллический, твердость которого меньше твердости сопряженной детали. Свойства материала: достаточная статическая и динамическая прочность при повышенных температурах; способность образовывать прочный граничный слой смазочного материала и быстро восстанавливать

его в местах, где он разрушен; низкий коэффициент трения при граничной смазке; высокая теплопроводность, теплоемкость, прирабатываемость; хорошая износостойкость сопряжения; не дефицитность материала и высокая технологичность.

Выбор материалов при конструировании узлов трения

Выбор материалов представляет собой трудную задачу, несмотря на то, что практика машиностроения располагает большим опытом в этом деле. Выбор зависит:

- от конструкции и назначения узла;
- технологии производства;
- условий эксплуатации;
- от требований к общей прочности деталей;
- срока их службы и надежности при учете стоимости материала и его дефицитности;
- затрат на изготовление деталей.

Пример: сплавы, содержащие графит более износостойки, чем не содержащие графит, углеродистая сталь уступает чугунам с шаровидным графитом.

Числовые критерии работоспособности материалов в парах трения

Проверку правильности выбора материалов пар трения и скольжения при заданных или принятых сопрягаемых размерах деталей и определение этих размеров при проектном расчете производят по некоторым критериям:

- наиболее простой способ проверки заключается в расчете по среднему давлению p . Способ пригоден для пар трения, работающих с малыми скоростями скольжения при невысоких температурах окружающей среды, и имеет целью обезопасить сочленение от возможного заедания.

- если режим трения пары определяется не только давлением p , но и скоростью V . Идея метода в следующем: если f - коэффициент трения

скольжения, то $f_p V$ представляет собой удельную мощность трения. Поскольку надежная работа узла возможна лишь, при теплонапряженности, не превышающей определенную величину для данной конструкции и условий ее эксплуатации, то, обозначив через A предельное количество теплоты, которое может находиться с единицы площади в единицу времени, условие напряженности узла по теплонапряженности можно записать:

$$f_p V \leq A, \text{ если } f = \text{const}, \text{ то } V \leq \text{const}.$$

Правила сочетания материалов

1) Сочетать твердый материал с мягким, имеющим температуру рекристаллизации ниже средней температуры поверхности трения. Такая пара металлов хорошо противостоит заеданию и характеризуется высокой надежностью. Хорошие результаты дают пары хром-резина при смазывании минеральным маслом и водой; хром- бронза при пластичных смазочных материалах.

2) Сочетать твердый материал с твердым (сочетание пар из азотированной, хромированной и закаленных сталей). Такие пары трения обладают высокой износостойкостью. Нанесение покрытий увеличивает надежность работы. Высокая точность изготовления и сборки, значительная жесткость конструкций, тщательная пригонка, улучшение условий смазки значительно расширяют область применения пар трения твердых материалов.

3) Избегать сочетаний мягкого материала по мягкому, а также пар из одноименных материалов каждый друг по другу. Подобные пары имеют низкую износостойкость и ненадежны в работе. При незначительных перегрузках в парах образуются очаги схватывания и происходит глубокое вырывание материалов с взаимным налипанием их на поверхность трения.

4) Применять в труднодоступных для смазывания конструкциях пористые спеченные материалы и антифрикционные сплавы.

5) Применять в качестве фрикционных и антифрикционных материалов пластические массы. Они повышают надежность и срок службы узла трения,

снижают массу конструкции и расход дефицитных цветных металлов, уменьшают вибрации.

6) Стремиться путем выбора материалов пары трения, смазочных материалов или присадок к ним создавать при работе пары условия реализации режима избирательного переноса при трении.

7) При выборе материалов учитывать возможность при эксплуатации наводороживания трущихся поверхностей, что резко снижает износостойкость и надежность работы узла трения. Применять материалы, трудно поддающиеся наводороживанию.

8) Стальные детали узлов трения при окончательной доводке их поверхность подвергать финишной антифрикционной безабразивной обработке.

Пористость материала

Во многих случаях пористость материала трущихся деталей служит конструктивным или технологическим фактором повышения надежности их работы вследствие улучшения режима смазки или противозадирной стойкости пары. Детали из стального литья работают лучше, чем полученные давлением из-за лучшего смазывания смазочными маслами.

Металлизационное покрытие, полученное напылением, имеет пористость до 10% объема.

Анодирование и фосфатирование создают поверхностную пористость.

Пористость материала образуется при получении его методом порошковой металлургии, электрохимическим способом, обычным металлургическим процессом, а также при механической обработке.

Расположение материалов пар трения по твердости

Для пары, которая образована скользящими поверхностями, имеющими разные твердость и размеры площадей трения, можно выявить следующие два условия:

$$1) H_1 < H_2; S_1 < S_2$$

$$2) H_1 > H_2; S_1 < S_2$$

где: H_1 и H_2 - твердости трущихся поверхностей; S_1 и S_2 - соответствующие площади поверхностей трения.

Пару с расположением материалов, удовлетворяющими первому условию, называют прямой парой трения, а второму условию - обратной парой. В первом случае по большей поверхности скользит более твердое тело, во втором - более мягкое тело.

Пример прямой пары: скольжение закаленного суппорта по чугунной термически необработанной станине.

Пример обратной пары: скольжение хромированного поршневого пальца по поверхности цилиндра из перлитного чугуна.

Замена в узлах машин трения скольжения трением качения

Такая замена во многих случаях целесообразна с точки зрения повышения надежности работы деталей и экономичности машин.

Подшипники качения имеют следующие преимущества:

- уменьшаются потери на трение, поэтому опоры качения целесообразнее устанавливать в узлах машин, работающих с частыми пусками и остановками;
- на изготовления вкладышей подшипников скольжения расходуется большое количество цветных металлов (медь, олово, свинец и т.д.);
- уменьшается расход смазочных материалов;
- отпадает надобность в принудительном охлаждении;
- упрощается уход;
- у валов при правильно назначенных посадках отсутствует износ шеек;
- подшипники качения стандартизированы, что упрощает конструирование подшипникового узла;
- применение подшипников качения уменьшает стоимость машины.

Недостатки подшипников качения:

- недостаточная надежность при высоких окружных скоростях и динамических нагрузках (выкрашиваются);
- большие диаметральные размеры при меньшей длине, чем у подшипников скольжения;
- неудовлетворительная работа в условиях вибрационной нагрузки;
- большой шум при работе;
- недостаточная коррозионная и тепловая стойкость;
- значительно меньшая грузоподъемность и долговечность упорных подшипников;
- неудобны, когда требуется разъемная опора.

Учет температурных деформаций детали

Различная температура в отдельных частях машин и наличие температурных градиентов по длине и толщине стенок детали являются причинами неравномерных тепловых деформаций.

Тепловые деформации изменяют форму, величину зазоров и натягов в сопряжениях, в также взаимное расположение поверхностей, установленных при сборке.

Задача учета температурных деформаций при конструировании деталей узлов трения и компоновка машины сводится к:

- 1) правильному назначению зазоров в сопряжениях;
- 2) разработке мер для возможно меньшего искажения конфигурации трущихся поверхностей в рабочем состоянии и уменьшения отрицательного влияния на функциональные свойства машины перемещений, вызванные тепловой деформацией отдельных ее узлов.

Для обеспечения равномерного и постоянного температурного поля в прецизионных, технологических машинах и аппаратуре следует:

- исключить нагрев машины проникающими прямыми солнечными лучами;
- уменьшить местный нагрев повышением КПД механизмов;

- вынести за пределы машины или интенсивно охлаждать источниками теплообразования или теплоотдачи;
- по возможности применяют циркуляционное смазывание;
- использовать при необходимости для подогрева отдельных частей нагретый воздух от ветровых приводов;
- заменить в прецизионных станках клиновой приводной ремень плоским, менее нагревающимся при работе;
- применять щитки около открытых быстровращающихся деталей в целях использования воздуха для охлаждения машины или механизма.

Способы установки узлов, уменьшающие дополнительные нагружения при монтаже и в эксплуатации

Установка машин и механизмов может быть связана с возникновением начальных напряжений в деталях конструкций, что отрицательно сказывается как на общей прочности деталей, так и на надежности подвижных сочленений.

Например: установка механизмов и машин на четыре точки (лапы) при недостаточной жесткости корпуса. Малейшее несоответствие взаимного расположения опорных поверхностей и поверхностей лап по высоте или по плоскости затяжки крепления болтов вызывает деформацию корпуса. Необходимо установить на 3 точки, например трех точечная подвеска двигателя в автомобилях.

Защита рабочих поверхностей пар трения от загрязнения

Многие машины и механизмы работают в запыленной или загрязненной среде. На открытые поверхности трения машины возможно попадание окалины, ржавчины, металлической или иной стружки и др.

Необходима защита поверхностей трения от загрязнений.

Например: направляющие металлорежущих станков при надлежащей защите сохраняют следы шабрения или шлифования, но истечении 8-10 непрерывной работы.

Защита от загрязнения подразделяется на:

- защиту крытых узлов трения;
- герметизацию закрытых корпусов в местах выхода валов или других неподвижных деталей;
- очистку смазывающего масла;
- удаление загрязнений из топлива, смазочного материала, воздуха, газов и жидкостей.

9.2 Методы повышения износостойкости деталей и узлов трения машин в эксплуатации

Конструктивное совершенство и высокое качество изготовления и установки машин не гарантируют длительной и безаварийной ее работы. Дополнительным условием является грамотная техническая эксплуатация и целесообразная система ремонтов.

Задачами технической эксплуатации машины является обеспечение ее исправного технического состояния и безаварийной работы при надлежащей экономичности.

Уровень технической эксплуатации машин определяется:

- установкой их в надлежащем месте;
- рациональным использованием в соответствии с назначением;
- квалификацией обслуживающего персонала;
- постановкой ухода и технического надзора за машинами;
- организацией смазочного хозяйства.

Важной предпосылкой правильного использования и грамотной эксплуатации машины является наличие:

- ее технического описания;
- правил технической документации:

- основных правил техники безопасности при обслуживании машины;
- альбома чертежей и карт смазывания.

Цель технического ухода и ремонта - поддержание работоспособности машины.

Изменение свойств смазочного материала при эксплуатации

Смазочный материал при работе стареет, т.е. первоначальные свойства изменяются в результате физических и химических процессов, которым он подвергается.

Физико-химические изменения масел связаны с их окислением, под которым понимают совокупность химических превращений в масле в присутствии кислорода. В результате окисления масла изменяется их химический состав:

- а) увеличивается содержание в нем исходных смолистых веществ и образуются новые;
- б) повышается плотность и температурная величина;
- в) масло приобретает более темный цвет;
- г) увеличивается вязкость.

Отложения на деталях и в смазочной системе

Отложения образуются в результате старения масла. Отложения могут быть трех видов: нагар, лак и осадки.

Нагар имеет обычно черный цвет, хотя может быть и белого, оранжевого, коричневого и др. цветов.

Лак - это полимерные образования.

Шлак - это тестообразное или полутвердое вещество от светло-коричневого до черного цвета, состоящее из жидкости и нерастворяемых в ней веществ, загущающих ее в эмульсию или суспензию. Шлак может встречаться в виде отдельных сгустков, плавающих в масле. Шлак забивает фильтры и т.п.

Пенообразование

Пена представляет собой соединения микроскопических пузырьков газа или пара, отделенных друг от друга пленкой жидкости толщиной около 10⁻⁵ см. Пена образуется при взаимодействии масла.

Отрицательные явления пенообразования:

- уменьшается подача масляных насосов;
- появляется пульсация давления в системе;
- ухудшается смазка вследствие разрыва масляной пленки;
- пузырьками воздуха масло уносится через зазоры, стыки;
- искажаются показания уровня масла в картере;
- ускоряется окисление масла.

Обкатка машин

Назначение обкатки- приработка в едином комплексе всех пар трения, входящих в состав машины.

Во время обкатки должны быть реализованы два процесса:

1 - износ поверхностей на вершинах вон и шероховатости поверхности и на участках, где исходные технологические неточности, дефекты монтажа препятствуют распространению пятна контакта.

2 - ликвидация исходной шероховатости поверхности и формирование новой, с определенными параметрами и направленностью, характерными для каждой поверхности трения при работе машины.

Критерий оценки окончательной приработки:

- а) переход на прямолинейный участок кривой изнашивания;
- б) достижения минимума мощности, потребляемой на холостой ход машины;
- в) стабилизация момента трения и температуры;
- г) достижение определенной степени прилегания контактирующих поверхностей.

Длительность обкатки определяется:

- а) начальной величиной шероховатости;
- б) точностью обработки деталей и их сборки;
- в) материалом деталей;
- г) режима обкатки.

Особенности конструкции и обработки корпусных деталей

Корпусные детали в большинстве случаев являются базовыми деталями, на которые монтируются отдельные сборочные единицы. К ним относятся корпуса коробок передач, редукторов, блоки цилиндров, картеры и др. для корпусных деталей характерно наличие точно обработанных отверстий, скоординированных между собой относительно базовых поверхностей.

Корпусные детали при всем их многообразии конструкций можно разделить на две основные разновидности – призматические и фланцевые. Корпуса призматического типа, например корпус коробки передач или блок цилиндров двигателя, характеризуются большими наружными поверхностями и расположением отверстий на нескольких осях. У корпусов фланцевого типа базовыми поверхностями служат торцовые поверхности основных отверстий и поверхности центрирующих выступов или выточек.

Корпусные детали выполняются литыми из серого чугуна и реже – из стали. Материалом для изготовления корпусных деталей обычно служат серый чугун марок СЧ 24; СЧ 15; ковкий чугун КЧ 35-10 или алюминиевые сплавы марок АЛ4, АЛ6, АЛ9.

Корпусные детали ввиду их конструктивной сложности, как правило, изготавливаются в виде отливок в песчаные и металлические формы или литьем под давлением. Отливки должны обеспечивать герметичность корпуса. Твердость отливок из серого чугуна должна быть 160...240 НВ, а отливок из алюминиевых сплавов – 50-70 НВ.

При изготовлении отливок большое значение придается их качеству. До отправки в механический цех у отливок удаляют литники и прибыли,

термической обработкой снимают внутренние напряжения, очищают поверхность, контролируют размеры, качество поверхности, твердость и др.

Для корпусных деталей характерно наличие базовых поверхностей, а также основных и крепежных отверстий. Базовые поверхности корпуса стыкуются с другими узлами или агрегатами автомобиля.

Основные отверстия предназначены для монтажа опор валов. Точность диаметральных размеров основных отверстий соответствует 7 качеству, реже – 8 качеству, шероховатость поверхности $R_a - 2,5 \dots 0,63$ мкм. Межосевые расстояния основных отверстий выдерживают согласно стандарту с допусками, обеспечивающими необходимую точность работы зубчатых и червячных передач.

Отклонение отверстий от соосности устанавливают в пределах половины допуска на диаметр меньшего отверстия. Отклонение от параллельности осей отверстий допускается $0,02 \dots 0,05$ мм на 100 мм длины. Отклонение от перпендикулярности торцовых поверхностей к осям отверстий допускается $0,02 \dots 0,05$ мм 100 мм радиуса. Базовые поверхности обрабатывают с допускаемыми отклонениями от прямолинейности на $0,05 \dots 0,2$ мм по всей длине и с шероховатостью $4,0 \dots 0,63$ мкм.

Базирование корпусных деталей выполняют с учетом их конструктивных форм и технологии изготовления. Рассмотрим наиболее распространенные схемы базирования. Наиболее надежными и простыми технологическими базами при обработке корпусных деталей являются одна из плоскостей наибольшей протяженности и два отверстия, расположенные по диагонали на этой плоскости и как можно дальше удаленные друг от друга, что обеспечивает точное ориентирование деталей.

Заготовки деталей фланцевого типа базируют по торцу фланца и точно обработанной поверхности буртика. Вместо поверхности буртика в качестве базы может быть принята поверхность основного отверстия.

Если конфигурация корпуса не позволяет эффективно использовать его поверхности для базирования, то обработку целесообразно выполнять в

приспособлении-спутнике. При установке заготовки в спутнике могут быть использованы черновые или искусственно созданные вспомогательные базовые поверхности, причем заготовка обрабатывается на различных операциях при постоянной установке в приспособлении, но положение самого приспособления на разных операциях меняется.

Технологические процессы изготовления корпусных деталей различных автомобилей имеют общую последовательность выполнения операций механической обработки. Однако содержание и построение технологического процесса отдельных деталей могут иметь отличия, которые зависят конструктивной формы, размеров, вида заготовки, технических требований на их изготовление. Типовой маршрут изготовления корпусной детали можно представить в виде следующей последовательности:

- обработка базовых и сопрягаемых поверхностей;
- фрезерование или протягивание других ответственных поверхностей;
- черновое и чистовое растачивание основных отверстий;
- сверление, зенкерование, нарезание резьбы, развертывание второстепенных отверстий;
- тонкое растачивание или хонингование точных отверстий;
- окончательная обработка поверхностей, обеспечивающая высокую точность размеров и точное взаимное пространственное расположение поверхностей.

Вопросы для самопроверки

1. Как зависит твердость от строения кристаллических решеток железа, цинка, меди и хрома?
2. В чем различие понятий, характеризующих прочностные свойства металлов – пределов текучести, прочности и выносливости?
3. Каково отличие и в каких единицах измеряются значения твердости по Бринеллю и Роквеллу?
4. Какова сущность и основное назначение диаграммы железо-углерод?

5. В чем заключается принципиальное отличие серых, высокопрочностных и ковких чугунов, и каковы их технологические свойства?
6. Чем отличается маркировка сталей обыкновенного качества и качественных углеродистых сталей? Каким символом обозначаются высококачественные стали, и что подразумевается под этим понятием?
7. Какие элементы в наибольшей степени оказывают влияние на прочностные свойства, пластичность, твердость и упругость легированных сталей?
8. В чем принципиальное различие между отжигом и нормализацией?
9. Какова роль и значение закалки и отпуска при термической обработке сталей?
10. Что понимается под термином «улучшенная сталь»?
11. Для каких сталей наиболее эффективна поверхностная закалка электронагревом ТВЧ?
12. В чем сходство и принципиальное различие между цементацией, азотированием и цианированием?
13. Какие сплавы на основе меди получили наибольшее распространение при изготовлении деталей автомобиля; в чем их сходство и различие?
14. Каково основное назначение баббитов и в чем заключаются особенности их маркировки?
15. Какие виды алюминиевых сплавов получили распространение в автомобилестроении и для изготовления каких деталей они используются?

Задания для самоконтроля

1. Вычертите диаграмму растяжения малоуглеродистой стали и укажите основные значения соответствующих пределов прочности.
2. Расшифруйте нижеследующие марки чугунов: СЧ18, ВЧ50, КЧ35-10 и приведите примеры возможного их использования для изготовления деталей автомобиля.
3. Расшифруйте нижеследующие марки сталей: 08кп, 20пс, 40Х, 18ХГТ и укажите их классификационную принадлежность.

4. Дайте расшифровку приведенным маркам сталей и укажите какую из них целесообразно подвергать закалке ТВЧ: сталь 65Г, сталь 15ХГНТА, сталь 45.
6. Укажите назначение и виды термической обработки, применяемые после цементации и цианирования. Приведите примеры улучшаемых сталей и укажите основное назначение этого вида термической обработки.
7. Для изготовления каких деталей автомобиля применяются нижеследующие марки сталей: 65Г, 50С2, 60С2ХФА. Каково их общее наименование, и какому виду термической обработки они подвергаются?
8. Расшифруйте нижеприведенные сплавы цветных металлов: Л70, ЛС59-1, Бр. ОЦС4-4-4, Бр. С30, Б83 и укажите их основное назначение.
9. Что представляют собой силумины и для изготовления каких деталей их используют в автомобилестроении?
10. Укажите основные технологические свойства сплавов цветных металлов. Что понимается под свариваемостью этих материалов, и какие элементы способствуют улучшению их механической обработки?
11. Приведите примеры коррозионностойких, жаропрочных и жаростойких сталей, укажите их назначение и область применения. Каково принципиальное различие понятий жаростойкость и жаропрочность?
12. Что такое автоматные и литейные стали? Приведите примеры и укажите, какие химические элементы определяют их основные технологические свойства.

Лекция 10. Неметаллические конструкционные материалы в автомобилестроении

Неметаллические конструкционные материалы имеют достаточно большую номенклатуру. Причем основой большинства неметаллических материалов, применяемых в автомобилестроении, являются полимеры, главным образом, синтетические. К такого рода материалам, прежде всего,

относят пластмассы и резинотехнические изделия, широко применяемые в производстве и ремонте автомобилей.

Весьма существенную роль целесообразного применения пластмасс в качестве машиностроительных материалов, помимо чисто технических соображений, играют экономические. Экономичность применения пластмасс при изготовлении и восстановлении деталей автомобиля выражается в снижении себестоимости их производства. Так, при использовании многих ответственных металлических деталей требуется, как правило, три вида обработки (литье, термообработка и механическая обработка) с большим числом технологических операций (до 30...50), в то время как для пластмассовых деталей достаточен только один вид обработки – формование детали методом пластического деформирования. Экономическая целесообразность применения пластмасс связана со снижением затрат на исходные материалы ввиду широкомасштабных и недефицитных ресурсов для их производства (нефти, природного и промышленного газа, целлюлозы и др.), а также массы одноименных изделий, способствующих снижению материалоемкости, так как, в среднем, плотность пластмасс примерно в два раза ниже плотности такого, например, металла, как алюминий.

Детали из пластмасс не только в 4...9 раз дешевле одноименных деталей из цветных металлов, но, в отдельных случаях, в 2...6 раз дешевле деталей из черных металлов. Масштабы применения пластмасс при изготовлении и ремонте автомобилей непрерывно увеличиваются и, в ближайшее время, могут достичь 10% и более общей массы автомобилей, а их номенклатура может превысить 1000 единиц. Большие возможности дальнейшего роста потребления пластмасс в автомобилестроении дает применение полимерных обивочных теплоизоляционных материалов, топливных баков и, что особенно важно, серийное производство пластмассовых кузовов.

Применение пластмасс в конструкции автомобиля позволяет снизить массу, улучшить эксплуатационные характеристики автомобиля, повысить его травмобезопасность и комфортабельность. Основным направлением применения пластмасс и композитов на их основе в автомобилестроении является внедрение крупногабаритных наружных деталей кузова. Разработка высокопрочных композиционных материалов армированных стеклянными, углеродными волокнами с полимерной матрицей позволила расширить их применение в качестве нагруженных силовых деталей автомобиля. Сведения о применении полимерных материалов в отечественном и зарубежном автомобилестроении для узлов и деталей легкового автомобиля представлены в таблице 6.

Таблица 6 - Применение полимерных материалов в автомобилестроении

Группа узлов и деталей автомобиля	Полимерные материалы						
	Поли-этилен низкого давления	Поли-про-пилен	Поли-стирол АБС-пластик	Поли-уретаны	Поли-амиды	Поли-эфирные стекло-пластики (препреги)	Поли-карбонаты
1	2	3	4	5	6	7	8
Детали внешней облицовки решетки радиаторов, спойлеры, колпаки колес		+	+	+			+
Детали пассивной защиты: панели приборов, бамперы, рулевые колеса, внутренние накладные двери, подлокотники и подголовники		+	+	+		+	+
Амортизационные детали: прокладки, подушки и спинки сидений				+			
Крупногабаритные детали кузовов: панели дверей внутренние, панели дверей наружные, крылья, капоты, багажники		+	+	+		+	
Емкостные детали для хранения жидкостей: топливные баки, маслобаки, бачки омывателей, бачки для тормозной жидкости; расширительные бачки, ящики аккумуляторных батарей	+	+					

1	2	3	4	5	6	7	8
Детали зацепления и ременных передач: зубчатые и червячные колеса, звездочки, шкивы, храповики			+		+		
Детали узлов трения: подшипники скольжения, втулки, вкладыши				+	+		+
Корпусные детали: кожухи, крышки корпусов, коробки, кожухи отопителей, рабочие органы крыльчатки вентиляторов, насосов, компрессоров, корпуса воздушных фильтров	+	+	+	+	+		+
Детали систем питания, охлаждения и смазки двигателя: трубки, пробки, фильтры, масленки	+	+			+		
Светотехнические детали: плафоны, рассеиватели, задние фонари, указатели поворотов							+
1	2	3	4	5	6	7	8
Детали общего назначения: рукоятки, щитки, кнопки, ручки, колпачки	+	+	+		+		
Детали информационного назначения: фирменные таблицы, схемы, шкалы, таблички на пленки			+				
Детали, подвергающиеся электромеханическим нагрузкам, электроизоляционного назначения: крышки распределителей, коллекторы, катушки, переключатели, контактные колодки, платы	+	+			+		
Детали внутренней отделки салона кузова: декоративные профили, прошвы	+		+				

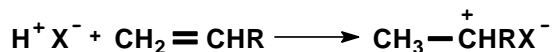
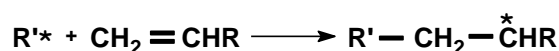
Методы получения высокомолекулярных соединений.

В современном машиностроении в качестве конструкционных материалов часто используются полимерные материалы. При выборе конструкционных полимерных материалов необходимо учитывать их свойства и методы получения. В связи с этим *целью данной работы является ознакомление с основными методами синтеза высокомолекулярных соединений.*

Высокомолекулярные соединения или полимеры – это вещества с очень большой молекулярной массой, молекулы которых содержат повторяющиеся группировки атомов.

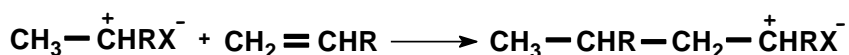
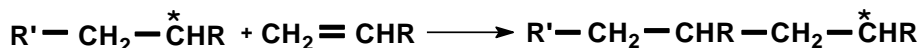
Существуют два основных способа получения высокомолекулярных соединений: полимеризация и поликонденсация.

Полимеризация – реакция соединения молекул мономера, протекающая за счет разрыва кратных связей и не приводящая к изменению элементарного состава мономера. В реакцию полимеризации вступают в основном ненасыщенные мономеры, у которых двойная связь находится между углеродными атомами или между атомом углерода и любым другим атомом. В зависимости от характера активных частиц различают радикальную и ионную полимеризацию. При радикальной полимеризации процесс инициируется свободными радикалами, при ионной полимеризации – катионами или анионами. Полимеризация является цепной реакцией и протекает через несколько стадий:

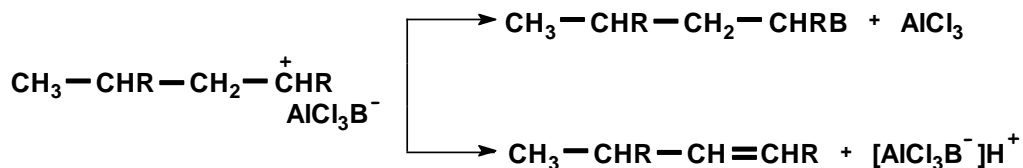
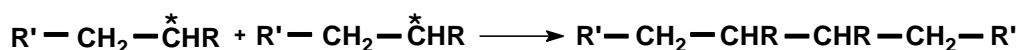


инициирование, рост цепи и обрыв цепи. На первой стадии происходит образование свободного радикала (R'^{\bullet}) или иона (H^+X^-), которые легко взаимодействуют с непредельными соединениями.

На второй стадии идет процесс многократного присоединения молекул мономера к усложняющемуся каждый раз радикалу или иону.

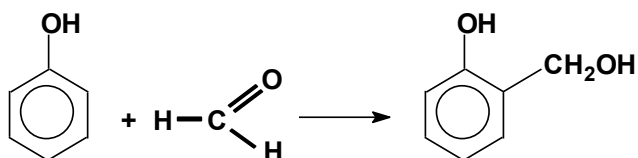


Процесс обрыва цепи связан с исчезновением свободных радикалов или ионов у последнего звена макромолекулы.



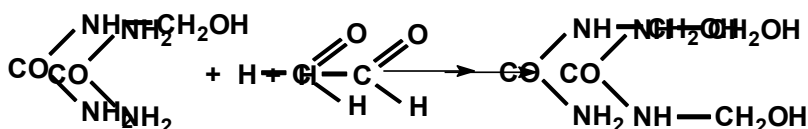
Поликонденсация – процесс образования полимеров химическим взаимодействием молекул мономеров, сопровождающийся выделением низкомолекулярных веществ (воды, хлороводорода, аммиака, спирт и др.). В процессе поликонденсации происходит взаимодействие между собой функциональных групп, содержащих в молекулах мономеров (-ОН, -СООН, -NH₂, галогены и др.). Мономеры, вступающие в реакцию поликонденсации, должны быть не менее чем бифункциональными. В случае бифункциональных мономеров при конденсации образуются линейные полимеры (линейная поликонденсация). Если в поликонденсацию вступают мономеры с функциональностью, равной трем и более, то образуются разветвленные или пространственные полимеры (пространственная поликонденсация). Поликонденсация протекает по ступенчатому механизму. Первая стадия – образование активных центров (функциональных групп). При конденсации исходные мономеры уже содержат активные функциональные группы. Однако бывает и так, что эти группы создаются непосредственно в процессе поликонденсации, например при синтезе фенолформальдегидных, мочевиноформальдегидных и аминокформальдегидных полимеров.

Образующие активные центры (метилольные группы) вступают в реакцию

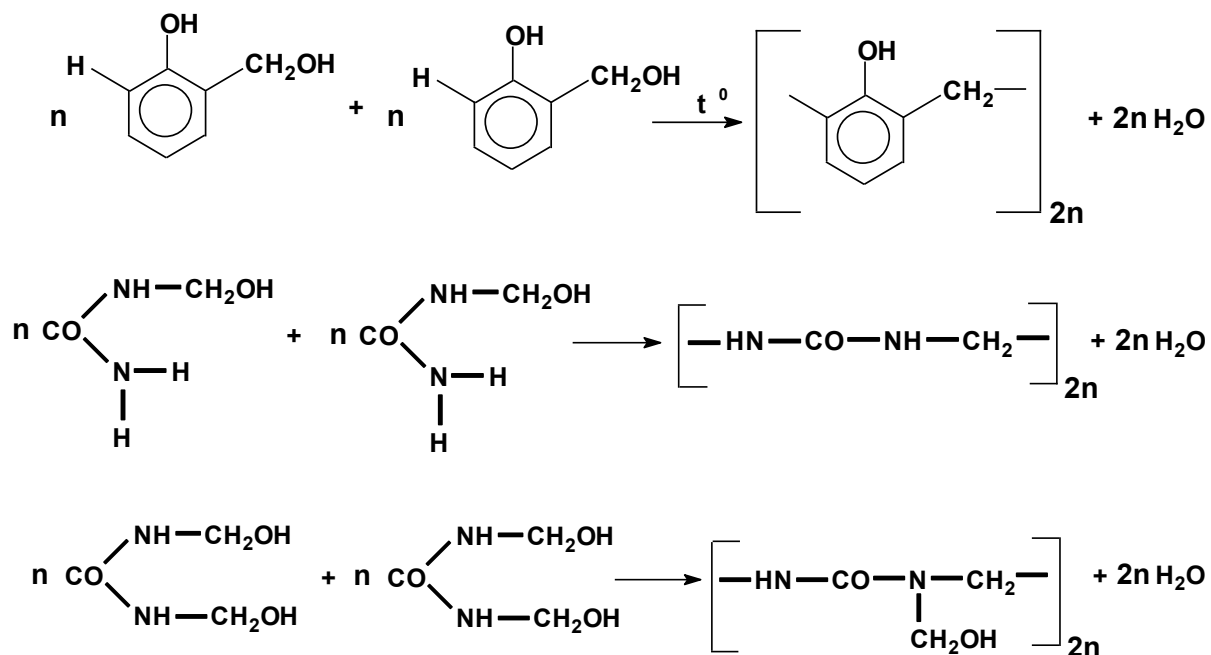


поликонденсации между собой.

Вторая стадия – рост цепи, связана с выделением низкомолекулярных веществ, при этом состав элементарных звеньев полимеров не соответствует составу исходного мономера, что отличает реакцию поликонденсации от полимеризации.



Особенностью стадии роста цепи процесса поликонденсации является независимость отдельных актов роста цепи друг от друга. Поэтому данный процесс представляется как суммы однотипных реакций, происходящих между молекулами мономера, димера, тримера и т.д.



Третья стадия – прекращения роста и обрыв цепи, наступает вследствие установившегося равновесного состояния, изменения структуры и нарушения эквивалентности функциональных групп, увеличения вязкости реакционной среды и уменьшения подвижности макромолекул. Продукты поликонденсации представляют сложную смесь, в которую могут входить фракции полимер-гомологов, низкомолекулярные соединения, побочные продукты и непрореагировавшие мономеры.

Лекция 11. Старение и износ автомобилей. Старение автомобилей и их составных частей

Старением называется процесс необратимого изменения его свойств и состояния, обусловленного структурными превращениями, химическими изменениями в материалах, из которых изготовлены детали, а также

постепенным накоплением в элементах конструкции автомобиля микро- и макроповреждений при эксплуатации.

При эксплуатации автомобиля имеют место физическое изнашивание деталей, потеря усталостной прочности их материала. Как при эксплуатации автомобиля, так и при его хранении происходят изменения, связанные с коррозией, потерей жесткости, структурные изменения и химические превращения в металлах, потеря некоторых свойств. Процессы старения всегда связаны со временем.

Процесс старения механизма определяется процессами старения всех образующих его деталей и нарушением их взаимного расположения. Старение деталей происходит в результате воздействия нескольких разрушительных процессов и является результатом воздействия большого числа факторов.

Изнашиванием называется процесс отделения материала с поверхности твердого тела и увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющейся в постепенном изменении размеров и формы тела. Износ является результатом изнашивания и определяется в установленных единицах (толщины слоя, объема, массы).

Процесс изнашивания обычно происходит в три стадии. На стадии 1 идет приработка сопряженных поверхностей деталей, занимающий небольшой отрезок времени. При этом износ изменяется нелинейно, скорость изнашивания высокая, но постепенно убывает. Стадия 2 является наиболее продолжительной и характеризуется стабильностью процесса. Скорость изнашивания в этом случае небольшая и постоянная. Стадия 3 – ускоренное изнашивание, характеризующейся резко возрастающей скоростью изнашивания. Причиной этого является изменение условий трения из-за изменения размеров и форм трущихся поверхностей.

Деформация детали может быть обратимой (упругой) и необратимой, т.е. остаточной. Деформация возникает при появлении напряжений в материале детали. Если возникающие напряжения в материале детали

меньше предела его упругости, то будет иметь место главным образом упругая деформация. Однако упругая деформация может сопровождаться и остаточной деформацией, например, при повышенных температурах. Остаточная деформация изменяет размеры и конфигурацию детали. Например, у такой сложной детали, как блок цилиндров двигателя, изменяется положение осей посадочных отверстий под гильзы, под вкладыши коренных подшипников коленчатого вала, а также появляется коробление и нарушается положение обработанных поверхностей относительно технологических баз, что приводит к снижению долговечности двигателя в целом.

Разрушение приводит к полному расчленению детали. Разрушения бывают вязкими, хрупкими и усталостными.

Вязкое разрушение происходит от касательных напряжений вследствие значительной пластической деформации. Плоскость разрушений расположена под углом к направлению приложения нагрузки и совпадает с направлением действия касательных напряжений.

Хрупкое разрушение происходит под действием нормальных напряжений. Ему предшествует небольшая пластическая деформация, и плоскость разрушения оказывается перпендикулярной направлению приложения нагрузки. Процесс разрушения состоит из двух стадий: в первой стадии происходит зарождение трещины, а во второй – ее развитие через все сечение детали.

Усталостное разрушение деталей является результатом многократного приложения нагрузок и происходит при напряжениях, значительно меньших, чем в случае однократного нагружения. Трещина при усталостном разрушении зарождается в поверхностных слоях, где действуют максимальные растягивающие напряжения. По мере ослабления сечения темп развития трещины усиливается и при определенном остаточном сечении происходит полное разрушение детали.

Коррозия представляет собой разрушение металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой.

Эрозия и кавитация возникают при действии на металл потока жидкости, движущейся с большой скоростью. На поверхностях деталей, подвергающейся жидкостной эрозии, образуются пятна, полосы, вымоины. Таким повреждениям подвергаются детали системы охлаждения двигателя, крылья кузова, воспринимающие со стороны колес поток воды, песка и мелких камней. Кавитационное повреждение металла происходит тогда, когда нарушается непрерывность потока жидкости и образуются кавитационные пузырьки. Кавитационные пузыри, которые находятся у поверхности детали, уменьшаются в объеме с большой скоростью, что приводит к гидравлическому удару жидкости о поверхность металла. Сосредоточение в одном месте на поверхности металла большого количества таких ударов вызывает образование кавитационных разрушений в виде каверн диаметром 0,2 ... 1,2 мм. Такому разрушению часто подвергаются детали системы охлаждения двигателя, гильзы цилиндров, посадочные пояски блоков цилиндров под гильзу, патрубки и др.

С течением времени или по мере роста наработки в состоянии автомобиля или его составных частей наступает предел, после которого использование автомобиля оказывается нецелесообразным: автомобиль достиг предельного состояния.

Предельным состоянием автомобиля и его составных частей называется состояние, при котором их дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление их невозможно или нецелесообразно. Так, например, необходимость смены масла в картерах агрегатов связана с достижением масла предельного состояния при изменении их смазывающих свойств; выполнение регулировочных работ обуславливается достижением предельных зазоров в сопряжениях; замена или ремонт детали диктуется износом хотя бы одной ее

рабочей поверхности до предельного размера. Количественные значения показателей предельного состояния устанавливаются нормативно-технической документацией.

Износ машины – это естественный процесс ухудшения ее состояния со временем. Расчет износа машины может быть полезным при определении стоимости использованного транспортного средства или при оценке его технического состояния.

Существует несколько методов для расчета износа машины:

Метод пробега. Данный метод основан на измерении пробега автомобиля и его соотношении с нормой износа. Норма износа зависит от конкретного автомобиля и может быть указана в его техническом паспорте или регламенте обслуживания. Рассчитать износ можно по формуле: $\text{износ} = (\text{фактический пробег} / \text{норму износа}) * 100\%$.

Метод возраста. Этот метод основан на учете возраста автомобиля с момента его выпуска. Степень износа зависит от конкретного автомобиля и может быть указана в его техническом паспорте или определена опытом. Рассчитать износ можно по формуле: $\text{износ} = (\text{фактический возраст} / \text{срок службы}) * 100\%$.

Комплексный метод. Данный метод основан на сочетании различных факторов, таких как пробег, возраст, состояние автомобиля и другие. Результат расчета может быть более точным, но требует более сложного подхода и анализа данных.

При расчете износа машины важно учитывать конкретные характеристики автомобиля, такие как его марка, модель, состояние и условия эксплуатации. Кроме того, следует принимать во внимание как естественный износ, так и износ, вызванный авариями или неправильной эксплуатацией.

Параметр	Значение
----------	----------

Марка	Toyota
Модель	Camry
Год выпуска	2015
Пробег	100 000 км
Норма износа	200 000 км
Срок службы	10 лет

В данном примере можно рассчитать износ машины по методу пробега.

$$\text{Износ} = (100\,000 / 200\,000) * 100\% = 50\%$$

Важно помнить, что расчет износа машины – это лишь один из инструментов для оценки технического состояния транспортного средства. Для получения более точной информации рекомендуется обратиться к специалистам или провести детальный технический осмотр.

Износ автомобиля: основные факторы

Износ автомобиля — это нормальный процесс, в результате которого с течением времени и эксплуатации автомобиля возникают повреждения и износ деталей и элементов его конструкции.

Основные факторы, влияющие на износ автомобиля:

Интенсивность использования. Чем чаще автомобиль используется и чем больше он пробегает, тем быстрее происходит его износ. Длительные поездки по автобану или трассе меньше нагружают автомобиль, чем частые короткие поездки по городу, с частыми остановками и переключениями передач.

Качество дорог и условия эксплуатации. Плохое качество дорог, зимние периоды с солевыми реагентами, экстремальные погодные условия и другие факторы, которые негативно влияют на дорожное покрытие, приводят к более активному износу автомобиля.

Качество и регулярный уход. Некорректное использование автомобиля и неправильный уход могут ускорить процесс износа. Регулярное обслуживание, смена масла в двигателе и другие предписанные процедуры могут помочь продлить срок службы автомобиля.

Стиль вождения. Агрессивный стиль вождения, частое резкое ускорение и торможение, сильные повороты и дрифт, частое превышение скорости и другие опасные маневры могут привести к более быстрому износу и поломкам автомобиля.

Вид использования. Если автомобиль используется для перевозки тяжелых грузов или для тяжелой работы (например, на стройке), это также может ускорить процесс износа автомобиля.

Возраст и пробег автомобиля. С течением времени и пробегом автомобиля возрастают износ и повреждения его деталей и элементов. Возраст автомобиля также может повлиять на техническое состояние его систем и компонентов.

При оценке износа автомобиля важно учитывать все эти факторы и обратить внимание на состояние различных систем и деталей автомобиля. Регулярный технический осмотр и обслуживание помогут поддерживать автомобиль в надлежащем состоянии и уменьшить процесс износа.

Способы определения износа автомобиля

Определение уровня износа автомобиля является важным этапом при оценке его состояния. Следующие способы помогут вам определить степень износа автомобиля:

Внешний осмотр: Внимательно осмотрите кузов автомобиля на наличие царапин, сколов, коррозии или повреждений. Убедитесь, что все детали на месте и не оторваны. Проверьте состояние колес: шины должны иметь достаточную глубину протектора и не иметь трещин или износа.

Тест-драйв: Проведите тест-драйв на различных типах дорог. Обратите внимание на работу двигателя, трансмиссии, тормозных систем и подвески.

Любые необычные звуки, вибрации или проблемы с управлением могут означать наличие износа или неисправности.

Проверка под капотом: Откройте капот и осмотрите двигатель, батарею, регуляторы и другие важные компоненты. Проверьте уровень и цвет масла. При наличии грязного или обгоревшего масла, а также признаков утечки жидкостей, автомобиль может быть подвержен износу.

Документация и история обслуживания: Проверьте наличие документов обслуживания и истории автомобиля. Убедитесь, что регулярное техническое обслуживание было проведено и все ремонты были сделаны своевременно. Наличие подробной истории обслуживания может указывать на то, что автомобиль был хорошо ухожен и возможных проблем с износом было предотвращено.

Использование диагностического оборудования: При необходимости вы можете обратиться к специалистам, которые используют специализированное диагностическое оборудование для проверки различных систем автомобиля. Это может включать проверку электроники, датчиков, тормозной системы и других ключевых компонентов.

Важно понимать, что оценка степени износа автомобиля должна проводиться в комплексе с другими факторами, такими как возраст автомобиля, пробег, условия эксплуатации и т. д. При покупке подержанного автомобиля рекомендуется обращаться к специалистам или проводить осмотр с опытным автомехаником.

Как учесть износ машины при ее продаже

При продаже автомобиля важно учесть износ, чтобы правильно оценить его стоимость и не потерять при сделке. В этом разделе мы рассмотрим несколько ключевых аспектов, которые помогут вам учесть износ машины и получить максимально выгодную цену при продаже.

1. Внешний вид

Первое, на что обращают внимание потенциальные покупатели, это внешний вид машины. Проверить кузов на наличие царапин, вмятин и признаков коррозии. Если необходимо, надо выполнить ремонт, чтобы машина выглядела более привлекательно. Внимательно осмотреть стекла и фары, проверить состояние шин и дисков.

2. Техническое состояние

Важно оценить техническое состояние автомобиля. Проверить работу всех основных компонентов — двигатель, трансмиссию, тормоза, подвеску. Устранить все неисправности и произвести необходимое техническое обслуживание. Важно предоставить покупателю автомобиль в полностью исправном состоянии.

Расчет износа по ОСАГО

Сегодня согласно законодательству гражданам, попавшим в ДТП и имеющим действующий полис ОСАГО, страховая компания будет обязана возместить ущерб. Но сумма напрямую будет зависеть от величины износа автомобиля, отдельных его деталей. Процесс расчета можно осуществить самостоятельно, но у него имеются некоторые важные особенности. ЧТО ЭТО ТАКОЕ На данный момент расчет величины возмещения, выплачиваемой при возникновении ДТП и обращении в страховую, обязательно осуществляется с учетом износа транспортного средства. Учет износа по ОСАГО – процесс вычисления снижения стоимости узлов, отдельных деталей и всего автомобиля в целом. Причем процесс вычисления, а также сам факт износа транспортного средства достаточно подробно освещается в действующем на территории РФ законодательстве. При этом износ может быть нулевым даже на не новом транспортном средства. Подобное возможно при замене всех комплектующих, которые тем или же иным образом влияют на безопасность дорожного движения. Полный перечень таких деталей отражается в Приказе Минтранса РФ №20 от 25.01.11 г. Наиболее существенные факторы, которые в первую очередь влияют на

величину износа: дата выпуска транспортного средства; величина пробега автомобиля. При этом с учетом всех наиболее существенных факторов стоимость транспортного средства при не интенсивном износе его может быть снижена на 8-15% в течение одного года. На данный момент существует целых 5 различных способов осуществления расчета величины данного показателя. При этом узаконенной и обязательной к использованию является только одна. Износ деталей по ОСАГО вычисляется с использованием специализированной формулы.

На данный момент основополагающим документом, который осуществляет регулирование возмещения убытков и в том числе порядок вычисления величины возмещения является Федеральный закон №40-ФЗ от 25.04.02 г. (в редакции от 28.11.15 г.). Наиболее существенными разделами данного закона, которые необходимо обязательно учитывать при вычислении, являются: ст. №18 – кто имеет право на получение рассматриваемого типа компенсационных выплат; ст. №19 – непосредственно осуществление различного рода компенсационных выплат; ст. №20 – как происходит взыскание выплат компенсационного характера в случае, когда это требуется; ст. №12 – определение размера выплаты страхового типа, а также порядок осуществления данной процедуры; ст. №12.1 – как должна осуществляться независимая экспертиза в случае возникновения такой необходимости; ст. №16 – вопрос обязательного страхования при ограниченном использовании транспортных средств. Также вопрос вычисления величины износа по ОСАГО затрагивается в следующих нормативно-правовых документах: Постановление Правительства РФ №263 от 07.05.03 г.; п. №63 Правил ОСАГО. Следует помнить, что все страховые компании обязаны вести свою деятельность именно в рамках обозначенных выше законодательных актов. В противном случае на них будет наложена серьезная административная ответственность. В случае массового нарушения действующего законодательства возможно даже лишение компании лицензии. Процедуру расчета величины износа осуществляет независимая

экспертиза. Обычно с подобным учреждением у страховой компании заключен специальный договор. Но при этом необходимо помнить, что в большинстве случаев подобного рода учреждения осуществляют оценку не объективно, повышая величину износа. Потому стоит обязательно самостоятельно разобраться, как считают износ по ОСАГО. Относительно недавно был выпущен специальный сборник различного рода деталей, запасных частей – на основании именно его должен в обязательном порядке выполняться процесс расчета. Если результат экспертизы, сделанный партнером страховой компании, пострадавшего не удовлетворил, ему можно обратиться в компанию, которая специализируется на проведении аналогичных экспертиз. В некоторых случаях это позволяет разрешить ситуацию через суд. Так страховым компаниям всегда невыгодно выплачивать полную стоимость нанесенного своему клиенту ущерба. Следует помнить о множестве нюансов, непосредственно связанных с процедурой оценки величины износа автомобиля, отдельных его узлов. Какие сейчас действуют тарифы Зеленой карты, показано в статье: тарифы по Зеленой карте.

На данный момент для каждого отдельного узла автомобиля существует специальная формула вычисления величины износа.

Величина износа шин транспортного средства осуществляется следующим образом:

$$\text{Иш} = (\text{Нн} - \text{Нф}) / (\text{Нн} - \text{Ндоп}) * 100\%,$$

где Иш – количественная величина износа шины;

Нн – высота проектора новой шины конкретной модели;

Нф – высота проектора старой шины;

Ндоп – минимальная возможна для нормальной эксплуатации резины величина.

Износ аккумуляторной батареи вычисляется по следующей формуле:

$$\text{Иак} = \text{Так} / (\text{Тнак}) * 100\%,$$

где Иак – износ аккумуляторной батареи;

Так – возраст аккумуляторной батареи;

Тнак – каков установленный законодательством срок службы конкретной батареи.

Формулы рассматриваемого типа разработаны Государственной Думой для каждого узла автомобиля, который может пострадать каким-либо образом в аварии. Потому если расчет выплат по ОСАГО с учетом износа конкретный гражданин желает осуществить самостоятельно, то ему необходимо будет в обязательном порядке использовать специализированные формулы. Сами по себе они не сложны. Следует лишь правильно подбирать коэффициенты.

При возможности стоит обязательно ознакомиться с примером осуществления расчета величины износа по ОСАГО. Для этого лучше воспользоваться формулой:

$$И = И_{ост} + (И_{пр} - И_{ост}) * P / P_{пр},$$

где И – величина физического износа ТС;

И_{ост} – размер износа детали остаточный;

И_{пр} – предельно возможный допустимый износа;

P – уже израсходованный износ системы;

P_{пр} – предельная величина ресурса определенной детали системы.

Пример:

Заданы следующие условия: И_{пр} 80% И_{ост} 20% P 5% P_{пр} 100%

Процесс вычисления выполняется нехитрой подстановкой соответствующих значений в обозначенную выше формулу: $20\% + (80\% - 20\%) * 5\% / 100\% = 23\%$

При заданных условиях получаем, что величина износа составляет всего 23%. Потому страховая компания в данном случае должна будет возместить ущерб в размере оставшихся 77% от стоимости поврежденного имущества. Обозначенная выше формула является универсальной, применить её возможно к любым деталям транспортного средства.

Размер максимально возможного износа по ОСАГО с 01.10.14 г. был принят в размере 50%. Данный момент закреплён на законодательном уровне, нарушение его приводит к серьёзной административной ответственности. Большинство водителей считают данные поправки справедливыми, так как страховые компании и так получают достаточно большой доход от ведения своей деятельности. При этом детали, которые существенно влияют на безопасность движения, оплачиваются страховщиком всегда в 100% размере – вне зависимости от наличия износа и иных факторов, влияющих на стоимость.

При формировании законодательства, которое регулирует вопрос рассматриваемого типа, было составлено два специализированных перечня деталей, для которых: страховщик износа никогда не учитывает; износ учитывается в обязательном порядке. Сегодня износ следующих деталей при вычислении рассматриваемым способом не осуществляется: ремни и подушки безопасности; баллоны пневматической системы тормозов; остальные составные части пневматической системы тормозов; перепускные клапаны тормозной системы; электронные блоки пневматической тормозной системы; гидравлические усилители тормозов; реле гидронасоса АБС; реле магнитного клапана АБС; тормозные колодки и барабаны; датчики: износа тормозных колодок; положения тормозной педали; тормозные диски передних и задних колес; суппорты и тяги педали (тормозной); составные части рулевого механизма; шаровые наконечники. Полный перечень деталей, износ которых не должен учитываться при вычислении денежной компенсации, утверждён приказом Минтранса №365. При этом следует учитывать, что процесс вычисления несколько отличается при осуществлении расчета КАСКО. Для такой процедуры необходимо будет использовать специальные постановления Минюста. К узлам, деталям и механизмам, которые не вошли в обозначенный выше перечень, применяются стандартные разработанные страховщиками совместно с депутатами Государственной Думы формулы. При этом для некоторых

деталей устанавливаются специальные коэффициенты. Данный момент необходимо учитывать при самостоятельном осуществлении расчета.

Процент износа автомобиля по ОСАГО определить достаточно просто. Именно поэтому нередко возникают ситуации, когда простые страховщики узнают о факте наличия мошенничества со стороны страховой компании на этапе вычисления величины ущерба. В такой ситуации стоит придерживаться следующего алгоритма действий: заказать платную независимую экспертизу; сформировать исковое заявление в суд; ожидать судебного заседания. Рассматриваемого типа судебная практика крайне неоднозначна. Именно поэтому необходимо будет заранее ознакомиться с ней. Также стоит проконсультироваться с квалифицированным юристом по данному вопросу. Возможно, именно это позволит разрешить дело именно в пользу потерпевшего. Вся сложность обычно заключается в наличии грамотного юриста у страховой компании. И если ущерб был занижен незначительно, вернуть средства будет достаточно сложно. Сегодня процедура вычисления износа по ОСАГО имеет очень большое количество самых разных нюансов и особенностей. Именно поэтому стоит внимательно ознакомиться с действующим законодательством.

Библиографический список

1. Колесов, С. Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2008. – 535 с.

2. Воронин Н.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов для железнодорожной техники / Н.Н. Воронин, Д.Г. Евсеев, В.В. Засыпкин и др. - М.: Маршрут, 2004.-456 с.
3. Кузьмин Б.А. Технология металлов и конструкционные материалы / Кузьмин Б.А., Абраменко Ю.Е., Кудрявцев М.А., Евсеев В.Н., Кузьминцев В.Н. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
4. Вахламов, В. К. Автомобили: конструкция и элементы расчета / В. К. Вахламов. – М.: Академия, 2006. – 480 с.
5. Колесник, П. А. Материаловедение на автомобильном транспорте / П. А. Колесник, В. С. Кланица. – М.: Академия, 2005. – 320 с.
6. Колесов, С. Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2007. – 535 с.
7. Леликов, О. П. Основы расчета и проектирования деталей и узлов машин / О. П. Леликов. – 3-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2007. – 464 с.
8. Леликов, О. П. Основы расчета и проектирования деталей и узлов / О. П. Леликов. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2004. – 440 с.
9. Материаловедение и технология металлов / под ред. Г. П. Фетисова. – Изд. 6-е, доп. – М.: Высш. шк., 2008. – 877 с.
10. Нарбут, А. Н. Автомобили. Рабочие процессы и расчет механизмов и систем / А. Н. Нарбут. – Москва : Академия, 2007. – 256 с.
11. Н.В. Коровин. Общая химия. М. : Высшая школа, 1998, 450-466с.
12. А.И. Артеменко. Органическая химия. М. : Высшая школа, 1994, 479-503с.
13. Н.В. Коровин, Э.И. Мингулина, Н.Г. Рыжова. Лабораторные работы по химии. М.: Высшая школа, 1998.
14. Как правильно рассчитывать износ машины / URL: <https://treskamurmansk.ru/kak-pravilno-rasscityvat-iznos-masiny>
15. Карагодин В. И. Ремонт автомобилей и двигателей: 2-е изд. стер. – М.: Издательский центр “Академия”, 2003.
16. Коробейник А.В. Ремонт автомобилей.- Ростов-н/Д: “Феникс”, 2002.