

КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА МЕХАНИКИ

Классификация конструкционных материалов

Методическое пособие

Бишкек 2000

Составитель Б.А.Рычков

КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.
Методическое пособие /Кыргызско-Российский Славянский университет. - Бишкек, 2000. – 44 с.

Методическое пособие предназначено для студентов четвертого курса естественно-технического факультета. В нем содержатся основные понятия и терминология механической прочности и приведена современная классификация конструкционных материалов по основным эксплуатационным характеристикам с учетом назначения.

Печатается по решению кафедры механики
и РИСО КРСУ

© КРСУ, 2000 г.

Введение

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

Расчеты на прочность играют важную роль при проектировании инженерных конструкций и деталей самого различного типа и назначения. Конструкции и машины, рассчитанные в соответствии с современными принципами, должны быть прочны, достаточно жестки и использовать достаточное количество материала. При этих расчетах должны приниматься во внимание различные факторы. Одним из них является концентрация напряжений около отверстий и выточек в пластинах и трехмерных деталях.

Под *конструкционной прочностью* понимается прочность в местах концентрации напряжений как при статическом, так и при динамическом нагружении.

1. Напряжения

Условные напряжения - напряжения, отнесенные к первоначальной площади поперечного сечения деформируемого образца, обозначаются σ (нормальные) и τ (касательные).

Истинные (действительные) напряжения - напряжения, получаемые путем деления текущей нагрузки на площадь поперечного сечения образца в момент действия нагрузки; обозначаются S (нормальные) и t (касательные).

Номинальные напряжения - напряжения, вычисляемые по обычным формулам сопротивления материалов, без учета концентрации напряжений.

Однократно приложенные (постоянные) напряжения - напряжения, отвечающие постоянным значениям величины и направления действующих сил.

Статические напряжения - синоним однократно приложенных и постоянных напряжений, употребляется для обозначения напряжений, возникающих под действием длительно приложенных сил, медленно изменяющихся в период нагружения и разгружения.

Множественно приложенные (переменные) напряжения - напряжения, отвечающие переменным значениям величины и направления внешних сил.

Циклические напряжения - синоним многократно приложенных и переменных напряжений, употребляется для обозначения напряжений повторяющихся по определенному циклу нагрузок.

Динамические напряжения - напряжения, возникающие под действием ударных (мгновенно приложенных) сил.

Контактные напряжения - термин, применяемый в тех случаях, когда механические напряжения возникают при сжатии соприкасающихся деформируемых тел.

Приведенные напряжения - величины, пропорциональные максимальным упругим удлинениям; представляют собой условные напряжения, которые, если бы они существовали в действительности, вызывали бы при любом сложном напряженном состоянии то же упругое удлинение, что и при хрупком разрушении путем отрыва при основном растяжении; вычисляются по наибольшим положительным упругим удлинениям, в соответствии со второй теорией прочности (теорией постоянства наибольшей положительной упругой деформации), путем умножения упругого удлинения в данном направлении на модуль упругости; обозначаются - S^n .

Октаэдрические напряжения - нормальные и касательные напряжения, действующие на площадке, нормаль к которой равнонаклонна к трем главным осям; обозначаются S_n и t_n (или σ_0 и τ_0).

Концентрация напряжений - неравномерное распределение напряжений, связанное с конфигурацией детали.

Концентраторы напряжений - конструктивные элементы в деталях, вызывающие концентрацию напряжений. Концентраторами могут служить внутренние дефекты материала - трещины, раковины, различные включения и др. нарушения оплошности и однородности строения, играющие роль надрезов.

Градиент напряжений - производная от функции распределения напряжений по сечению, вычисленная в какой - либо точке сечения. Градиентом напряжения характеризуется скорость изменения напряжений в зависимости от координат сечения.

Релаксация напряжений - происходящий под влиянием температуры, напряжения и времени процесс самопроизвольного снижения напряжений в упругонапряженном изделии, поставленном в условия, которые не позволяют ему изменить величину суммарной начальной деформации (например, в затянутых болтовых соединениях). Если суммарная начальная деформация состоит из упругой и неупругой частей, то падение напряжения при релаксации возможно только за счет умень-

Примечание [TRU1]:

шения упругой части деформации и, следовательно, соответствующего возрастания неупругой части.

2. Деформация, разрушение

Упругая деформация - деформация, которая полностью устраняется с прекращением воздействия внешних сил. Упругие деформации сопровождаются обратимыми смещениями атомов и не вызывают заметных изменений в структуре материала.

Пластическая (остаточная) деформация - деформация, сохраняющаяся после снятия нагрузки и выражающаяся в остаточных изменениях формы; в металлах вызывается только тангенциальными напряжениями и почти не зависит от нормальных напряжений.

Сдвиговая деформация (трансляция) - деформация, осуществляемая путем сдвигов одной части кристалла относительно другой и двойникования. Деформация путем образования двойников наблюдается, когда скорость приложения напряжений очень велика, а также в случаях многоосного приложения напряжений и деформации при низких температурах.

Внутризеренная деформация - пластическая деформация, протекающая преимущественно путем сдвигов (скольжения) внутри кристаллических зерен; имеет место при значительных скоростях нагружения и при относительно низких температурах, когда сопротивление сдвигу меньше сопротивления отрыву.

Межзеренная деформация (разрушение) - деформация (разрушение), протекающая преимущественно по границам зерен путем их перемещения (и отрыва), имеет место в тех случаях, когда сопротивление сдвигу в теле зерен больше, чем сопротивление отрыву по границам зерен. Межзеренная деформация (разрушение) характерна для металлов, подвергающихся длительное время воздействию напряжения при высокой температуре и в условиях низких скоростей деформации.

Диаграмма деформации - графическое изображение функциональной зависимости между напряжением и деформацией.

Вязкое трение - остаточная деформация, зависящая от времени и наблюдаемая при высоких температурах; представляет направленное перемещение атомов, не зависящее от кристаллографической направленности в зерне.

Вязкое разрушение - разрушение с заметными следами пластической деформации (макроскопической деформации); происходит вследствие сдвигов одной части кристалла (зерна) по отношению к другой по определенным кристаллографическим плоскостям под действием кас-

тельных напряжений. Оно характеризуется волокнистым матового оттенка изломом.

Хрупкое разрушение - разрушение без видимой или с очень малой пластической деформацией; происходит вследствие нарушения внутренних связей между атомами (путем отрыва) под действием нормальных напряжений. У металлов оно характеризуется блестящей зернисто-кристаллической поверхностью излома.

Конструкционные материалы в современной технике; классификация материалов по основным эксплуатационным характеристикам с учетом назначения [1]

Научно-техническая революция в машиностроении неразрывно связана с созданием новых конструкционных материалов. Революционную роль в электронике сыграли полупроводниковые материалы и жидкие кристаллы, в авиации и ракетостроении - композиционные материалы, в радиотехнике - сверхпроводники и аморфные сплавы.

1. МАТЕРИАЛЫ С ПОВЫШЕННОЙ И ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТЬЮ [2-3]

а) Углеродистые и низколегированные конструкционные стали

Углеродистые стали представляют значительную группу конструкционных материалов; они составляют 80% общего объема продукции горной металлургии и применяются для изготовления различных металлоконструкций и изделий машиностроения. Содержание углерода определяет основные характеристики физических, механических и технологических свойств. По мере увеличения его количества возрастает доля цементита в структуре, что обуславливает затруднение перемещения дислокаций и соответственно - развитие сдвиговых процессов. В результате этого повышается прочность, но снижается пластичность, а иногда и вязкость.

Углеродистые стали с пониженным содержанием углерода (до 0,3%) имеют высокую вязкость разрушения ($K_{Ic} = 100 \div 120 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ при $\sigma_{0,2} = 500 \text{ МПа}$). При этом существенного прироста вязкости разрушения у высокоотпущенных сталей по сравнению с низкоотпущенными не наблюдается. Определение критерия K_{Ic} пластичных низкоуглеродистых сталей сопряжено со значительными трудностями, так как эти стали особенно широко применяются для изделий тонкого сечения, а существующие методики определения этого критерия основаны на испытании образцов большой толщины, при которой соблюдается условие плоской деформации, т.е. отсутствует остаточная деформация.

Максимально высокая трещиностойкость закаленных углеродистых сталей достигается при разных температурах отпуска, определяемых содержанием углерода. С увеличением содержания углерода, в связи с уменьшением запаса пластичности стали, оптимальная температура отпуска повышается. У стали 45 максимальная трещиностойкость соответствует отпуску при 400-500⁰ С, что обусловлено получением хорошего сочетания прочностных и пластических свойств при таком режиме термической обработки. При переходе к более высокоуглеродистым сталям температура отпуска, при которой достигается максимальный уровень трещиностойкости, сдвигается в область более высоких температур.

Повышение температуры отпуска выше оптимальной приводит к такому разупрочнению сталей, когда эффекты, связанные с увеличением трещиностойкости в результате роста пластичности, уже подавляются значительным падением прочности.

Низколегированные конструкционные стали содержат до 0,2 %С и до 2-3% в основном недефицитных легирующих элементов (марганец, кремний). Эти стали применяются, как правило, в нормализованном, реже - в горячекатаном состоянии. Их механические свойства можно улучшить с помощью термической обработки, которую целесообразно проводить после нагрева под прокатку. После закалки и отпуска упрочнение сочетается с малой чувствительностью к надрезу. Они несомненно дороже углеродистых, но по сравнению с ними имеют лучший комплекс механических свойств, повышенную хладостойкость, пониженную склонность к механическому старению, повышенную износостойкость и коррозионную стойкость в различных средах.

б) Высокопрочные среднелегированные стали (30ХГСН2А, 40ХСН2МА, 25Х2ГНТА). Область применения: 30ХГСН2А - цилиндры, балки, работающие на срез шпильки и оси, групповые болты, нагруженные осевой силой. 40ХСН2МА - высоконагруженные детали, не имеющие значительных концентраторов напряжения. 20Х2ГНТА - балки, болты, оси, нагруженные внутренним давлением сосудов.

Эти стали выплавляются в электродуговых печах с последующим вакуумно-дуговым переплавом. Стали хорошо деформируются в горячем состоянии, свариваются дуговой ручной и автоматической сваркой в среде защитных газов или под флюсом. Сталь 30ХГСН2А сваривается также электронно-лучевой сваркой.

Основной тип сварного соединения - сварка встык. Тавровые соединения допускаются, однако при этом обязательно должно быть утолщение металла обоих «полок» таврового соединения. Утолщение металла в зоне

шва рекомендуется и для стыковых соединений. Сварные швы размещаются вне зоны действия концентраторов напряжения, предусмотренных в чертежах. Сварка проводится до закалки и отпуска на заданный уровень прочности. Перед сваркой детали следует нагревать до температуры 200-300⁰ С в течение 3 ч во избежание появления трещин.

в) Высокопрочные высоколегированные (мартенситно-старяющие) стали созданы на базе систем *Fe-Ni-Mo*, *Fe-Ni-Co-Mo*, *Fe-Cr-Ni-Mo*, *Fe-Cr-Ni-Co-Mo*. Стали этого класса обладают уникальными свойствами: высокой прочностью при достаточной пластичности и вязкости, высоким сопротивлением малым пластическим деформациям, хрупкому и усталостному разрушению, что в сочетании с хладостойкостью, теплоустойкостью, коррозионной стойкостью и размерной стабильностью определяет высокую эксплуатационную надежность изделий из этих сталей, которая не достигается при использовании сталей других классов. *Применение:* стоимость данных сталей выше, чем низко- и среднелегированных сталей, однако более простая упрочняющая термообработка сталей этого класса, их технологичность, высокая конструктивная прочность, надежность и ряд других преимуществ не только компенсируют высокую стоимость, но и делают более выгодным их использование в различных отраслях машиностроения, в приборостроении и инструментальной промышленности. Наиболее целесообразно использовать их прежде всего для изделий, от которых требуется высокая удельная прочность в сочетании с высокой эксплуатационной надежностью.

2. МАТЕРИАЛЫ С ПОВЫШЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ [4-6]

а) Чугуны - своеобразный композитный материал, механические и эксплуатационные свойства которого зависят от характеристик металлической основы (прочность, пластичность, твердость и др.), а также формы, размеров, количества и распределения графитовых включений. При этом решающее значение в ряде случаев имеет либо графит, либо металлическая основа. Например, модуль упругости чугуна зависит от формы и величины графитовых включений, а твердость определяется свойствами металлической основы. Такие свойства, как временное сопротивление разрыву, ударная вязкость, длительная прочность зависят как от свойств металлической основы, так и от формы или размеров и количества графитовых включений.

Наличие графитовых включений делает чугун, особенно с пластинчатым графитом, практически нечувствительным к надрезам, что позволяет ему конкурировать с более прочной сталью по сопротивле-

нию усталости и пределу выносливости. Эти включения обеспечивают высокую износостойкость чугуна в условиях трения скольжения со смазкой.

б) Латунни представляют собой двойные или многокомпонентные медные сплавы, в которых цинк является основным легирующим компонентом. По сравнению с медью они обладают более высокой прочностью (в том числе при повышенных температурах), коррозионной стойкостью, упругостью, технологичностью (литье, обработка давлением, резание), трибологическими характеристиками. Это наиболее дешевые и распространенные медные сплавы.

в) Бронзы - это сплавы меди, которые по химическому составу подразделяются на две группы: оловянные (основной легирующий элемент - олово) и безоловянные, не содержащие олово в качестве легирующего элемента. По технологическому признаку бронзы делятся на литейные и деформируемые. Литейные бронзы предназначены для фасонных отливок. Деформируемые бронзы хорошо поддаются обработке давлением. Бронзы по сравнению с латунями обладают лучшими механическими, антифрикционными свойствами и коррозионной стойкостью. В качестве легирующих элементов в бронзе используют олово, алюминий, никель, марганец, железо, кремний, свинец, фосфор, бериллий, хром, цирконий, магний и др.

г) Медно-никелевые сплавы - сплавы на основе меди, в которых основным легирующим элементом является никель. Легирование меди никелем значительно повышает ее механические свойства, коррозионную стойкость, термоэлектрические характеристики. Промышленные медно-никелевые сплавы условно разделяются на две группы: конструкционные и электротехнические. К первой группе относятся коррозионно-стойкие и высокопрочные сплавы типа мельхиор, нейзильбер и куньяль. Мельхиоры имеют высокую коррозионную стойкость в различных средах - в пресной и морской воде, в органических кислотах, растворах солей, в атмосферных условиях. Добавки железа и марганца увеличивают стойкость медно-никелевых сплавов против ударной коррозии. Являясь твердыми растворами, мельхиоры обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии. Сплавы на основе меди, в которых основными легирующими элементами являются никель и цинк, называются нейзильберами. Это твердые растворы; легирование цинком приводит к повышению механических свойств и приданию сплавам серебристого цвета и удешевлению. Сплавы на основе тройной системы *Cu-Ni-Al* называют куньялями. Они отличаются высокими механическими и упругими свойствами, коррозионной стойкостью, устойчиво-

стью при низких температурах. Обрабатываются давлением в горячем состоянии.

3. МАТЕРИАЛЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ [7-23]

а) Процесс изнашивания и методы повышения износостойкости

В зоне взаимодействия поверхностей деталей при трении и изнашивании в присутствии различных жидких и газообразных сред происходят следующие явления и процессы. На участках фактического контакта шероховатых поверхностей действуют громадные удельные нагрузки, определяемые в пределе твердостью материалов, находящихся в контакте. При граничной смазке давления перераспределяются незначительно. Лишь при условиях гидродинамической или электрогидродинамической смазки нагрузка в трущемся сопряжении распределяется более равномерно по номинальной площади контакта. В зоне контакта вершин поверхностных неровностей при трении неизбежны громадные деформации сдвига и при тяжелых режимах трения (высокие скорости и нагрузки) возникают температурные вспышки, могущие достигать точки плавления материалов, находящихся в контакте. В результате поверхностных неровностей, непосредственно участвующих в трении, а также оксидные и адсорбированные пленки и «зажатая» между поверхностями смазка находятся в своеобразных миниатюрных химических реакторах с экстремальными параметрами (по нагрузкам, температурам и сдвиговым деформациям). В этих коротко живущих (при больших скоростях скольжения) микрореакторах осуществляются различные физические и химические процессы в весьма неравновесных условиях с образованием новых веществ и состояний материалов трущихся тел.

В соответствии с ГОСТ 27674-88 *изнашивание* классифицируется как процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела. В результате изнашивания возникает износ, определяемый в абсолютных или относительных единицах. В абсолютных единицах износ определяется по потере массы путем взвешивания, уменьшению линейных размеров, изменению объема детали. Износ, отнесенный к пути трения, объему выполненной работы, работе трения и т.д., является показателем интенсивности изнашивания. Износ, отнесенный ко времени процесса трения, определяет скорость изнашивания. Виды и характеристики изнашивания определены ГОСТ 23.001-77. Нередко детали машин работают в условиях *кавитации*. Изнашивание в этом случае, получившее название кавитационного, происходит при захлопывании вблизи поверхности детали пузырьков газа или пара (каверн), что создает местное повышение дав-

ления или температуры, приводящие к отделению частиц износа и разрушению поверхностных слоев. Большое количество трибонапряжений работают в условиях токосъема. В этом случае возникает электроэрозионное изнашивание поверхности трения в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока. Наибольший урон сельскохозяйственным машинам, горнодобывающему оборудованию, дорожно-строительным машинам и т. д. наносит абразивное (и коррозионно-абразивное) изнашивание. От естественного абразива (главным образом частиц SiO₂ оксида кремния) с твердостью HV10000 МПа избавиться нельзя, можно только защищаться от него, используя уплотнения, и что более эффективно, применяя для трущихся сопряжений материалы с высокой твердостью (желательно превышающей твердость абразива). Как правило, такие материалы хрупки и непригодны для изготовления динамически нагруженных деталей машин.

Одной из основных причин износа металлических материалов является схватывание трущихся поверхностей. Это приводит к образованию наростов, задиров, заеданию, катастрофическому повреждению поверхностей трения и изнашиванию. Явление схватывания лежит также в основе так называемой *фреттинг - коррозии* сопряжений, работающих при вибрации или относительном перемещении поверхностей с малой амплитудой (первая стадия представляет собой микросхватывание трущихся поверхностей).

Для предотвращения схватывания или снижения вызываемых повреждений до приемлемого уровня осуществляют следующие мероприятия:

- для трущихся пар выбирают сочетания материалов с минимальной способностью к схватыванию;
- легируют материалы с целью снижения способности к схватыванию и повышения противозадирных свойств;
- повышают твердость сталей термической обработкой (закалкой);
- изменяют состав и состояние поверхностных слоев химико-термической (цементация, азотирование, сульфидирование и т.д.) и поверхностной термической (закалка, ТВЧ, лазерная и электро-лучевая закалка) обработкой;
- на поверхности трения наносят пленки мягких металлов и сплавов (индия, кадмия, серебра, меди, латуни и т.п.);
- вводят мягкие составляющие (свинец, олово) в антифрикционные сплавы (свинцовистые бронзы, алюминиево-оловянные сплавы);

- используют материалы, выполняющие функции твердой смазки (графит, фторопласт-4 и т.п.);

- в пористую металлическую основу вводят жидкие или пластические смазки (пористые самосмазывающиеся подшипники);

- для изготовления деталей трущихся сопряжений применяют материалы, обладающие относительно материала контртела низкой адгезионной способностью (полимерные материалы, естественная и модифицированная древесина, углеграфитовые антифрикционные материалы, рубин и др. оксидные керамики, алмаз);

- используют также конструктивные изменения трущихся тел.

б) Износостойкие материалы. Основным свойством, определяющим износостойкость при изнашивании закрепленным абразивом, имеющим твердость, намного превышающую твердость изнашиваемого материала, является твердость (микротвердость) поверхностного слоя. Условия, при которых в реальных случаях происходит абразивное изнашивание, разнообразны. Это позволяет однозначно ранжировать материалы по износостойкости (как это сделано, например, для прочности).

Наиболее объективную информацию об относительной износостойкости рассматриваемых материалов, твердость которых существенно выше твердости основного природного абразива (оксида кремния), дают значения твердости и модуля упругости. В значительной мере от этих характеристик зависят и противозадирные свойства материалов, важные для деталей машин, работающих в контакте не с абразивом, а друг с другом.

Из простых веществ высокой твердостью обладают лишь алмаз (углерод) и бор. Подавляющее большинство веществ с высокой твердостью - тугоплавкие химические соединения. Это металлоподобные карбиды, нитриды, бориды, силициды тугоплавких металлов IV-VI групп Периодической системы. Неметаллические бескислородные тугоплавкие соединения - это карбиды и нитриды бора и кремния (карбид кремния SiC- карборунд). Используются также оксиды алюминия, циркония и др.- это керамики и ситаллы. В качестве твердого износостойкого материала наибольшее распространение получил оксид алюминия. Устойчивая его модификация встречается в природе в виде простых (обыкновенный корунд, наждак и др.) и полудрагоценных (лейкосапфир, сапфир, рубин и др.) разновидностей. Цвет зависит от содержания других оксидов.

в) Износостойкие покрытия и модифицированные слои. Твердые износостойкие тугоплавкие соединения хрупки. По этой причине, а

также из-за технологических трудностей и высокой стоимости они, как правило, не могут быть использованы в качестве основных материалов для изготовления деталей машин. Удовлетворить противоречивые требования к поверхностным (высокая твердость и износостойкость, высокие антифрикционные свойства) и объемным (высокие прочность и ударная вязкость) свойствам можно путем создания композиций с послойным расположением материалов, выполняющих различные функции. В связи с тем, что допустимый износ деталей машин мал (обычно не более десятых долей миллиметра), толщина поверхностного слоя с заданным комплексом триботехнических свойств может быть небольшой.

Нанесение покрытий на те или иные материалы не просто улучшает их свойства, а приводит к образованию нового композиционного материала с присущим ему комплексом свойств, который должен учитываться при разработке конструкций машин и механизмов.

Существует много традиционных способов создания поверхностных слоев с повышенной износостойкостью. Наиболее широко применяются методы поверхностной закалки, поверхностного наклепа, различные химико-термические способы обработки (в первую очередь цементация и азотирование) и т.д. Все шире применяются методы, основанные на воздействии на поверхностные слои деталей потоков частиц (ионов, атомов, кластеров) и квантов с высокой энергией. К ним следует отнести в первую очередь вакуумные ионно-плазменные методы и лазерную обработку. Существенно развились также способы осаждения покрытий из газовой фазы при атмосферном давлении и в разряженной атмосфере. Мощный импульс получило применение газотермических методов нанесения покрытий в связи с развитием плазменных и детонационного способов напыления порошкообразных материалов различного состава. Значительный интерес представляет возможность создания поверхностных слоев с использованием метода контактного эвтектического плавления.

г) *Материалы, устойчивые к изнашиванию в условиях больших давлений и ударных нагрузок.* При повышенных нагрузках, и особенно при ударном ее приложении, износ и повреждения поверхностей трения будут определяться не только видом материала и его свойствами, но и специфическими условиями работы: теплонапряженностью, уровнем динамических воздействий, агрессивностью среды, наличием абразива и др. При ударном контактировании поверхностей различают следующие виды изнашивания: ударноабразивное, ударно-гидроабразивное, ударно-усталостное и ударно-тепловое.

Разрушение металла при ударноабразивном изнашивании осуществляется в результате малоциклового усталости микрообъемов металла вследствие циклического приложения нагрузки при упругопластическом контакте. Ударно-абразивное изнашивание связано с внедрением в металл твердой частицы. Критерием износостойкости, как правило, являются значения твердости. Чем выше твердость, тем выше сопротивляемость изнашиванию.

При ударно-гидроабразивном изнашивании соударение металлических поверхностей происходит при наличии жидкости и твердых частиц. При этом изнашивание происходит путем прямого внедрения частиц, связанного с ударом, и относительного их перемещения, что приводит к микрорезанию.

Ударно-усталостное изнашивание происходит при многократном соударении поверхностей в отсутствии абразивных частиц. В основе механизма изнашивания этого вида лежит многократная деформация поверхностного слоя, приводящая к наклепу, охрупчиванию и последующему отделению частиц. Износостойкость существенно снижается с увеличением энергии удара.

Ударно-тепловое изнашивание происходит при соударении поверхностей, которые по условиям работы испытывают значительный объемный нагрев. При таком виде износа отделение частиц происходит в результате многократного пластического деформирования или среза объемов металла при внедрении твердых частиц.

К материалам, устойчивым при работе в условиях больших давлений и ударных нагрузок, предъявляются следующие требования: а) повышенная твердость и одновременно определенный запас по пластичности; б) повышенная теплостойкость; в) высокая коррозионная стойкость.

Основными материалами для эксплуатации в условиях высоких давлений и ударных нагрузок являются инструментальные стали. В результате термической обработки они приобретают высокую твердость, прочность и износостойкость. Многие инструментальные стали обладают также теплостойкостью.

д) *Кавитационно-стойкие материалы*. Выбор кавитационно-стойких материалов определяется особенностями их работы в условиях кавитации. В движущемся потоке жидкости при уменьшении давления до уровня меньшего, чем упругость насыщенных паров, возникает нарушение сплошности, образуются полости, каверны, пузыри. При движении они сокращаются и исчезают - захлопываются. При смыкании полостей материал, контактирующий с жидкостью, испытывает гидро-

динамические удары, в результате которых происходит разрушение и эрозия. Давление при этом достигает 126-250 МПа, а температура - 230-720⁰ С.

В кавитационном разрушении материала определенное значение имеет абразивное изнашивание, так как в потоке жидкости в том или ином количестве всегда имеются абразивные частицы. На разрушение влияет и электрохимическая коррозия, которая сказывается в большей степени при малых скоростях потока. Наиболее весомым процессом, определяющим разрушение материала в процессе кавитации, является механическое силовое воздействие, приводящее к разрушению при контактировании. При таком воздействии разрушение может произойти вследствие усталости либо хрупкого или вязкого отделения частиц. При этом создается определенная степень деформационного упрочнения металла с возможным последующим разупрочнением. Однако, как правило, в процессе кавитации наблюдается повышение твердости, что указывает на преобладание процессов упрочнения. При увеличении кавитационного воздействия свойства металла (прочность, пластичность, твердость и др.) непрерывно изменяются. Энергия деформации расходуется на разрушение; большая же ее часть превращается в теплоту, идет на накопление дефектов, а другая часть расходуется на фазовые превращения, если они могут протекать в сплаве.

В инкубационный - начальный период энергия удара в основном расходуется на пластическую деформацию. При этом металл наклепывается. При кавитационном разрушении деформационное упрочнение и кинетика изменения твердости у металлов с однотипной решеткой разнятся весьма существенно.

Никель и медь упрочняются очень быстро и для них достигается предельное насыщение за короткий промежуток времени. Иначе ведут себя железо и золото. Они имеют большую кавитационно-эрозионную стойкость.

В развитии кавитационно-эрозионного разрушения большая роль отводится структурному фактору. Так, стали ферритного класса сопротивляются кавитационному разрушению хуже, чем аустенитные.

Кавитационная стойкость обратно пропорциональна величине зерна. Увеличивает кавитационную стойкость легирование. В качестве легирующих компонентов используют марганец и никель. Используют стали, у которых вследствие деформации увеличивается сопротивление разрушению при кавитации за счет структурных превращений, приводящих к образованию зерен малых размеров. Разработан новый класс сталей, названных трипсталями, т.е. сталями, в которых превращение

иницируется именно деформацией. В таких сталях высокая прочность и пластичность, а также кавитационная стойкость достигается выбором определенного режима термической обработки и температурной деформации. Состав трипстали следующий: 0,3 %C, 9%Cr, 8%Ni, 4%Mo, 2%Mn, 2%Si или 0,25%C, 25%Ni, 4%Mo, 1,5%Mn. Трипстали считают сплавами, сочетающими самую высокую прочность и вязкость. Поэтому они являются надежными конструкционными материалами.

Кавитационная стойкость чугунов, как правило, ниже стойкости стали. Наиболее слабыми участками микроструктуры, подверженными разрушению от кавитации, являются графитовые включения. Серый чугун с пластинчатым графитом обладает низкой кавитационной стойкостью. Чугун с шаровидным графитом имеет более высокую сопротивляемость кавитационным разрушениям. В отличие от серых белые чугуны обладают значительно большей кавитационной стойкостью. Кавитационная стойкость чугунов зависит не только от формы графита, но и от прочности металлической основы на границах раздела с графитом. С целью увеличения прочности основы чугуна его легируют чаще всего никелем или молибденом.

Нередко в условиях кавитации работают детали, изготавливаемые из цветных сплавов. Наиболее распространенными являются медные сплавы; получают также распространение титановые сплавы.

е) **Антифрикционные материалы** предназначены для использования в различных подшипниках скольжения. К числу таких подшипников относятся: гидродинамические и гидростатические, газодинамические и газостатические, самосмазывающиеся с твердой смазкой, самосмазывающиеся пористые (пропитанные жидким или пластичным смазочным материалом) и др.

К антифрикционным материалам предъявляются определенные требования. Они должны обладать: 1) по возможности низкими значениями коэффициента трения (для снижения потерь на трение); 2) высокой износостойкостью; 3) способностью быстро прирабатываться и легко приспособливаться к ужесточению условий работы трибосистемы (вторичная приработка); 4) повышенной сопротивляемостью к заеданию и задиру; 5) хорошими свойствами совместимости трибосистемы; 6) достаточной прочностью и сопротивляемостью усталостным, кавитационным и абразивным повреждениям.

Различают антифрикционные материалы металлические, неметаллические (полимерные, древесные, графитовые и др.) и комбинированные (металлополимерные, графитометаллические и др.). Наиболее распространенными являются сплавы на основе свинца и олова (бэбби-

ты), медные сплавы (бронзы и латуни), алюминиевые и цинковые сплавы. В меньшей мере используются чугуны и стали. Антифрикционные материалы на основе полимеров предназначены, как правило, для работы с жидкостями, не обладающими смазочными свойствами (водой и др.), и без смазки (в том числе в вакууме).

Для повышения антифрикционности, механических свойств и износостойкости, а в ряде случаев и теплопроводности, в исходные полимеры вводят различные наполнители. Часто полимеры используют в качестве составной части антифрикционных материалов, заполняющей поры конструкционной основы (металлической, углеродистой, древесной).

Полимеры являются также существенной частью (связующим) большинства твердосмазочных покрытий, нашедших применение главным образом в вакууме и некоторых газовых средах, в которых использование жидких и пластичных смазок по ряду причин недопустимо.

Для работы без смазки в различных газовых (исключая инертные газы, осушенные газы и воздух, вакуум) и жидких агрессивных средах в широком диапазоне температур (от -200°C до $+2000^{\circ}\text{C}$) нашли применение графитовые антифрикционные материалы. Они могут применяться как конструкционные для деталей, работающих при высоких температурах в безокислительных средах, что обусловлено повышением прочности графитовых материалов при увеличении температуры. Благодаря этому свойству при высоких температурах (более 1500°C) прочность графитовых материалов в инертных средах самая высокая.

Разработаны материалы на основе углерода. К ним относятся углеродистый графит, силицированный графит, углеродистые материалы с различными пропитками (для работы на воздухе при повышенных температурах) и т.п.

При трении графитовых материалов по металлам и другим твердым материалам (керамикам, различным твердым тугоплавким соединениям) на поверхности контртела образуется ориентированная пленка графита (плоскостью базиса параллельно поверхности скольжения). Наилучшая ориентация пленки и минимальные значения коэффициента трения наблюдаются при трении графита по металлам (карбидообразующим и растворяющим углерод), адгезия к которым максимальна.

Интенсивность износа при увеличении нагрузки изменяется мало, до определенного ее значения, превышение которого приводит к нарушению благоприятной ориентации перенесенной пленки, что сопровождается повышением коэффициента трения и многократным увеличением интенсивности изнашивания (пылевидный износ).

Углеродистые антифрикционные материалы применяют при изготовлении поршневых колец компрессоров для сжатия газов (попадание нефтяных смазочных материалов в которые недопустимо) и холодильных агрегатов, различных подвижных уплотнений для герметизации газовых и жидких сред, подшипников скольжения, различных направляющих.

ж) Фрикционные материалы. Тормозные устройства из фрикционных материалов предназначены для превращения кинетической энергии движущихся масс в теплоту при сохранении их работоспособности для последующих многократных циклов торможения. При работе в сцеплениях они должны надежно обеспечить передачу движения от того или иного двигателя к исполнительному механизму.

К специфическим условиям работы фрикционных материалов относятся: 1) широкий диапазон скоростей скольжения (до 50 м/с, иногда и выше) и нагрузок (до десятков тонн); 2) высокий уровень нагрева трущихся поверхностей вследствие трения без смазки; 3) трение в нестационарных условиях при многократных нагревах и охлаждениях; 4) различная продолжительность контактирования трущихся поверхностей.

При таких режимах работы фрикционная трибосистема должна обладать способностью тормозить в заданных условиях; коэффициент трения должен быть в пределах 0,2-0,5. Наименьший коэффициент трения назначается из условий создания необходимой силы трения; наибольший коэффициент определяется ограничением по самозаклиниванию. В автомобильных тормозах и на железнодорожном транспорте расчетный коэффициент трения принят равным 0,35 и 0,2, а в авиационных тормозах - 0,25-0,5. Коэффициент трения изменяется в зависимости от многих параметров (скорости, нагрузки, температуры) и определяется также видом материалов трущихся поверхностей.

Для легких условий эксплуатации (когда температура на поверхностях трения до 250°C) в качестве фрикционных материалов находят применение стали, чугуны и бронзы. При условиях эксплуатации средней тяжести (температура до 600°C) применяют асбофрикционные материалы и спеченные материалы на основе бронз. Для тяжелых и сверхтяжелых условий эксплуатации (до 1000°C и выше) применяют спеченные материалы на железной основе, а в последние годы - углеродные материалы (углеродные или графитовые волокна в углеродной матрице). При выборе материала принимается также во внимание способность прирабатываться и сопротивление изнашиванию.

4. МАТЕРИАЛЫ С ВЫСОКИМИ УПРУГИМИ СВОЙСТВАМИ [24-25]

К материалам с высокими упругими свойствами относятся пружинные стали и сплавы. Основным свойством, которым они должны обладать, является высокое сопротивление малым пластическим деформациям как в условиях кратковременного (предел упругости), так и длительного (релаксационная стойкость) нагружения. Между сопротивлением малым пластическим деформациям и пределом выносливости во многих случаях существует корреляционная связь. Установлена также связь между сопротивлением малым пластическим деформациям и степенью развития таких неупругих эффектов, как амплитудно-зависимое внутреннее трение, упругое последействие (прямое и обратное) и упругий гистерезис.

Таким образом, сопротивление малым пластическим деформациям определяет весь комплекс основных свойств пружинных сталей и сплавов.

Пружинные сплавы классифицируются по основным способам упрочнения и по назначению.

К сплавам, упрочняемым холодной пластической деформацией и последующим отпуском, относятся углеродистые и легированные стали перлитного класса с повышенным содержанием углерода (0,4-1,0%), а также низкоуглеродистые стали аустенитного класса, подвергаемые упрочнению холодной пластической деформацией (после предварительной термической обработки). В первую группу также входят сплавы меди (однофазные латуни, бронзы), молибдена и рения, ниобия и др.

Характерной особенностью всех сплавов рассматриваемой группы является анизотропия упругих свойств, резко выраженная в деформированном состоянии, но уменьшающаяся после отпуска (или при дорекристаллизационном отжиге) в результате перераспределения напряжений и дислокаций.

К сплавам, упрочняемым в результате мартенситного превращения, относятся углеродистые и легированные стали. Эти стали упрочняются в результате мартенситного превращения при закалке, в том числе совмещенной с различными видами термомеханической обработки - высокотемпературной (ВТМО) или низкотемпературной (НТМО) или в процессе холодной пластической деформации, как, например, в сталях переходного аустенитно-мартенситного класса.

Максимум сопротивления малым пластическим деформациям стали и сплавы этой группы приобретают после дополнительного отпуска (старения), в процессе которого помимо изменения структурного или фазового состояния уменьшается уровень внутренних напряжений.

К сплавам, упрочняемым в результате дисперсионного твердения (старения), относятся мартенситно-старяющие стали, аустенитные дисперсионно-твердеющие сплавы, бериллиевые бронзы и т.п., упрочнение которых является следствием выделения дисперсных частиц избыточных фаз из пересыщенного в результате закалки твердого раствора при последующем старении (или отпуске). Максимальное упрочнение этих сталей и сплавов достигается в случае использования термомеханической обработки по следующей технологической схеме: закалка, холодная пластическая деформация и старение (отпуск).

Наиболее перспективным направлением для получения высоких прочностных свойств у существующих сплавов и для создания новых высокопрочных пружинных сплавов является совмещение в каждом из них нескольких структурных механизмов упрочнения. В этом случае классификация даже по основным для каждой группы сплавов методам упрочнения теряет свою определенность и становится слишком сложной и в то же время недостаточно четкой. Поэтому считается более целесообразным классифицировать пружинные сплавы по назначению.

Пружинные сплавы общего назначения относятся к классу конструкционных материалов, и поэтому они должны в первую очередь обладать высокими пределами прочности, упругости, выносливости, релаксационной стойкостью и сопротивлением разрушению.

Пружинные сплавы специального назначения наряду с повышенными механическими свойствами должны иметь определенные физико-химические и физические свойства, требования к которым изменяются в зависимости от условий эксплуатации соответствующих упругих элементов. В частности, к этим сплавам могут предъявляться требования повышенной коррозионной стойкости, немагнитности, малого удельного электрического сопротивления и др.

Пружинные сплавы общего назначения - это углеродистые (стали 65, 70, 75, 80, 85, У9А, У10А, У11А, У12А) и легированные стали (60Г, 65Г, 50ХГ, 50ХГ, 55С2, 50С2, 50ХФА, 65С2ВА и др.).

Пружинные стали специального назначения разделяются на следующие группы: а) коррозионно-стойкие; б) немагнитные; в) с низким температурным коэффициентом модуля упругости; г) высокоэлектропроводные.

Коррозионно-стойкие сплавы применяют для изготовления пружин регулирующих устройств и приборов, работающих в коррозионно-активных средах. Применение таких пружин значительно эффективнее, чем пружин с гальваническими покрытиями.

Коррозионно - стойкие сплавы - сталь 20X13, 40X13, 12X18Н, 12X18Н9Т, 17ХГНТ, 36НХТЮ и др. Существует также множество других марок сталей применительно к различным условиям эксплуатации.

Немагнитные пружинные сплавы. Более высокая коррозионная стойкость в сочетании с немагнитностью и отсутствием склонности к хрупким разрушениям характеризует аустенитные хромоникелевые стали.

Широко применяют аустенитные стали типа 1X18Н9Т, 1X18Н10Т, упрочняемые после закалки пластической деформацией с высоким обжатием, в процессе которой, особенно при низких температурах, может образоваться так называемый мартенсит деформации, что увеличивает степень упрочнения, но в то же время делает сталь ферромагнитной.

В тех случаях, когда нужна полная немагнитность в сильноупрочненном состоянии, применяют стали 17X18Н9 и 37X12Н8Г8МФБ также после сильной деформации.

Для упругих элементов, часовых механизмов и т.д. применяют *сплавы с низким температурным коэффициентом модуля упругости*, что обеспечивает повышенную точность работы указанных изделий. Эти сплавы ферромагнитные, обычно на железоникельхромовой основе, упрочняются в результате термической и термомеханической обработки.

Высокоэлектропроводные пружинные сплавы. К этой группе относятся бериллиевые бронзы, фосфористая бронза и некоторые другие сплавы, преимущественно на основе меди.

Из многочисленных пружинных сплавов на основе меди наибольшее применение приобрели бериллиевые бронзы, т.е. меднобериллиевые сплавы с содержанием от 0,4-0,7 до 2-2,5% Ве, часто имеющие в своем составе и дополнительные легирующие элементы - никель, кобальт, титан, серебро, а также весьма эффективно влияющий на их свойства магний, количество которого не превышает 0,2%.

Широкое применение бериллиевых бронз в промышленности объясняется тем, что наряду с высокими значениями предела упругости и релаксационной стойкости они обладают хорошей коррозионной стойкостью, немагнитностью, повышенной электрической проводимостью и ценными технологическими свойствами - хорошо штампуются, паяются, свариваются и т.д. Прочностные свойства бериллиевых бронз настолько высоки, что в ряде случаев именно они независимо от их физико-химических свойств определяют использование этих сплавов в промышленности. Абсолютные значения предела упругости бериллиевых бронз - основного свойства пружинных сплавов - не превышают величин, которые можно получить для стали, но благодаря почти 1,5-2

раза меньшему модулю упругости (110-130 Г Па) они характеризуются максимальной энергией упругой деформации и максимальной упругой деформацией, которые могут быть достигнуты в упругих элементах. Поэтому при равном напряжении в упругих элементах из бериллиевой бронзы может быть достигнута большая упругая деформация, чем в упругих элементах из стали (значение этой деформации часто используется как основной параметр при конструировании упругих элементов), или соответственно при равном значении упругой деформации в этих изделиях из бронзы будут меньше действующие напряжения. Поэтому будут меньше и значения упругого гистерезиса, упругого последействия и других свойств несовершенной упругости - основных показателей качества упругих элементов.

5. МАТЕРИАЛЫ МАЛОЙ ПЛОТНОСТИ И ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ [26-40]

Алюминиевые сплавы хорошо поддаются горячей и холодной деформации: прокатке, ковке, прессованию, волочению, гибке, листовой штамповке и другим операциям.

Деформируемые алюминиевые сплавы разделяются на упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой.

Все свойства сплавов определяются не только способом получения полуфабриката заготовки и термической обработкой, но главным образом химическим составом и особенно природой фаз - упрочнителей каждого сплава.

Коррозионно-стойкие сплавы на основе систем Al-Mn и Al-Mg.

Сплавы типа Амц, Амг2, Амг6 не упрочняются термической обработкой. Они отличаются высокой пластичностью, хорошей свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью. Обрабатываемость резанием улучшается с увеличением степени легированности сплавов. Сплавы используются в отожженном, нагартованном и полунангартованном состояниях.

Применяются для изделий, получаемых глубокой вытяжкой, сваркой, от которых требуется высокая коррозионная стойкость (трубопроводы для масла и бензина, радиаторы тракторов и автомобилей, сварные бензобаки), а также для заклепок, корпусов и мачт судов, узлов лифтов и подъемных кранов, рам транспортных средств и др.

Сплавы системы Al-Cu-Mg. Дуралюмины Д1, Д16, Д18, ВД17 упрочняются термической обработкой; характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности.

Применяются: Д1 - для лопастей воздушных винтов, узлов креплений, строительных конструкций и др.; Д16 - для силовых элементов конструкций самолетов (шпангоуты, нервюры, тяги управления, лонжероны), кузовов грузовых автомобилей, буровых труб и др.; Д19 - для тех же деталей, что и из сплава Д16, но работающих при нагреве до 200-250⁰ С; Д18 - для заклепок; ВД17 - для лопаток компрессора двигателей, работающих при температуре до 250⁰ С. Дуралюмины хорошо свариваются точечной сваркой и практически не свариваются плавлением из-за высокой склонности к трещинообразованию. Все дуралюмины удовлетворительно обрабатываются резанием в закаленном и состаренном состояниях.

Жаропрочные сплавы типа АК4-1 системы Al-Cu-Vg-Fe-Ni по химическому и фазовому составу близки к дуралюминам, но вместо марганца в качестве легирующих элементов содержат железо и никель.

Сплавы хорошо деформируются в горячем состоянии; коррозионная стойкость удовлетворительная. Для защиты от коррозии детали подвергаются анодированию, оксидированию и покрываются лакокрасочными материалами.

Сплавы удовлетворительно соединяются точечной и шовной сваркой, хорошо обрабатываются резанием; отличаются высокой износостойкостью (низкий коэффициент трения).

Сплав АК4-1 используется для изготовления деталей реактивных двигателей (крыльчатые насосы, колеса, компрессоры, заборники, диски, лопатки).

Сплавы АД31, АД33, АВ повышенной пластичности и коррозионной стойкости системы Al-Mg-Si упрочняются по единому режиму: температура нагрева под закалку 520-530⁰ С, температура искусственного старения 160-170⁰С, время выдержки 10-12 ч. Для высоконагруженных деталей, работающих в условиях переменных нагрузок, старение проводят при 150-160⁰С. Для достижения максимальной прочности старение полуфабрикатов следует проводить не позднее чем через 1 ч после закалки, иначе наблюдается снижение временного сопротивления и технического предела текучести на 30-50 М Па.

Коррозионная стойкость сплавов высокая; они не склонны к коррозионному растрескиванию под напряжением независимо от состояния материала. Наиболее прочный сплав АВ по коррозионной прочности уступает сплавам АД31, АД33.

Сплавы удовлетворительно соединяются точечной, шовной и аргонодуговой сваркой. Обрабатываемость резанием в отожженном со-

стоянии неудовлетворительная, в закаленном и состаренном - удовлетворительная.

Сплав АД31 применяется для деталей невысокой прочности, от которых требуется хорошая коррозионная стойкость и декоративный вид, работающих в интервале температур -70 до $+50^{\circ}\text{C}$. Сплав применяется для отделки кабин самолетов и вертолетов с различными цветовыми покрытиями. Используется в строительстве для дверных рам, оконных переплетов, эскалаторов, а также в автомобильной, легкой и мебельной промышленности.

Сплав АД33 применяется для деталей средней прочности, работающих в таком же интервале температур и обладающих коррозионной стойкостью во влажной атмосфере и морской воде (лопасти вертолетов, барабаны колес гидросамолетов). Применяются в судостроении и строительстве.

Сплав АВ применяется для деталей, от которых при изготовлении требуется высокая пластичность в холодном и горячем состоянии (лопасти вертолетов, штампованные и кованные детали сложной конфигурации).

Ковочные сплавы АК6, АК8 системы Al-Mg-Si-Cu обладают хорошей пластичностью и стойкостью к образованию трещин при горячей пластической деформации. По химическому составу близки к дуралюминам, отличаясь более высоким содержанием кремния.

Сплавы склонны к коррозии под напряжением. Детали следует анодировать или защитить лакокрасочными покрытиями.

Сплавы удовлетворительно соединяются точечной и шовной сваркой, а сплав АК8 - аргонодуговой; хорошо обрабатываются резанием.

Сплав АК6 применяют для изготовления сложных штамповок (крыльчатки вентилятора для компрессоров реактивных двигателей, корпусные агрегатные детали, крепежные детали и др.).

Сплав АК8 применяют для высоконагруженных деталей самолетов, изготовленных ковкой и штамповкой (рамы, фитинги, пояса лонжеронов и др.). Сплав можно использовать для деталей, работающих в условиях криогенных температур.

Высокопрочные сплавы В95, В93, В96Ц1 системы Al-Zn-Mg-Cu отличаются высоким временным сопротивлением (600-700 М Па) и близким к нему по значениям пределом текучести.

Высокопрочные сплавы не являются теплопрочными и при длительной эксплуатации их можно использовать до температур не выше $100-120^{\circ}\text{C}$. Их применяют для высоконагруженных конструкций, работающих в основном в условиях напряжений сжатия (детали обшивки, стрингеры, шпангоуты, лонжероны самолетов и другие детали).

Снижение плотности - наиболее эффективный путь повышения удельной прочности и удельного модуля упругости, что достигается путем легирования алюминия литием и магнием.

Сплав 1420 системы Al-Mg-Li отличается от сплава Д16 пониженной на 11% плотностью и повышенным на 4% модулем упругости. Применение его в конструкциях вместо изделий из сплава Д16 позволяет снизить массу на 10-15%.

Литейные алюминиевые сплавы имеют низкую плотность и высокую удельную прочность; применяют для изготовления фасонных деталей.

По назначению конструкционные литейные алюминиевые сплавы можно условно разбить на следующие группы:

1) сплавы, отличающиеся высокой герметичностью [АЛ2, АЛ4, АЛ9, ВАЛ8, АЛ9-1, АЛ34 (ВАЛ5), АЛ4М, АЛ32];

2) высокопрочные жаропрочные сплавы [АЛ19, АЛ3, АЛ5, АЛ5-1, АЛ33 (ВАЛ1)];

3) коррозионно-стойкие сплавы (АЛ8, АЛ22, АЛ24, АЛ27, АЛ27-1).

Магниевые сплавы - хорошо поглощают вибрации, что важно для авиации, транспорта и машиностроения; обладают хорошей обрабатываемостью резанием; немагнитны и не дают искры при ударах; в горячем состоянии хорошо прессуются, куются и прокатываются; широко применяются в виде поковок, штамповок, листов, профилей, прутков, труб и т.д.

Промышленные магниевые сплавы принято делить на литейные для получения деталей методом фасонного литья (МЛ) и деформируемые для получения полуфабрикатов и изделий путем пластической деформации (МА). По применению их классифицируют на конструкционные и со специальными свойствами.

Области применения литейных магниевых сплавов:

МЛ2 - детали, от которых требуется повышенная коррозионная стойкость и герметичность (горловины, бензобаки, бензотопливная арматура и др.);

МЛ3 - детали с высокой герметичностью (детали арматуры корпусов насосов и др.);

МЛ4 - детали двигателей и других агрегатов, работающие в условиях высокой коррозионной стойкости, статических и динамических нагрузок (корпуса приборов и инструментов, штурвалы и др.);

МЛ5 - сплав общего назначения; нагруженные детали, работающие в условиях морской атмосферы, а также детали двигателей, приборов и др. (тормозные барабаны, кронштейны, штурвалы и др.);

МЛ6 - высоко- и средненагруженные детали (детали приборов, аппаратуры, корпуса и др.);

МЛ8 - нагруженные детали (реборды, барабаны колес и другие конструкции);

МЛ9 - детали двигателей, приборов и др.;

МЛ10 - нагруженные детали различных конструкций, двигателей, приборов и агрегатов, требующие высокой герметичности и высокой стабильности размеров;

МЛ11 - детали двигателей, приборов и агрегатов, требующие повышенной герметичности и не испытывающие высоких нагрузок при комнатной температуре;

МЛ12 - нагруженные детали (реборды, барабаны колес и другие конструкции);

МЛ15 - нагруженные детали двигателей, приборов, агрегатов, требующие герметичности.

Области применения деформируемых магниевых сплавов:

МА1- сварные детали несложной конфигурации, детали арматуры бензо- и маслосистем, не несущие больших нагрузок;

МА2 - кованные и штампованные детали сложной конфигурации для сварных конструкций;

МА2-1 - панели, штамповки сложной конфигурации для сварных конструкций;

МА5 - нагруженные детали;

МА8 - листы, плиты, штамповки сложной конфигурации для сварных конструкций;

МА11 - детали, нагревающиеся в процессе эксплуатации;

МА12 - детали, нагревающиеся в процессе эксплуатации;

МА14 - высоконагруженные детали;

МА15 - детали сварных конструкций, требующие повышенного предела текучести при сжатии;

МА19 - детали сварных конструкций, для которых требуется повышенный предел прочности и текучесть при растяжении и сжатии.

Сверхлегкие сплавы (магниеволитиевые сплавы). Особенности сверхлегких сплавов является низкая плотность (1,350-1,600 т/м³), повышенная пластичность и обрабатываемость давлением при температурах, значительно более низких, чем обычных магниевых сплавов, высокая удельная жесткость и высокий предел текучести при сжатии, отсутствие чувствительности к надрезу, незначительная анизотропия механических свойств, высокая теплоемкость, хорошие механические свойства при криогенных температурах.

Магниевые сплавы со специальными физическими и химическими свойствами. Сплав МА18 применяют для малонагруженных деталей, работающих при температуре от -253 до $+60^{\circ}\text{C}$, когда требуется высокая жесткость и малая масса. Сплав МА21 применяют для средненагруженных деталей, работающих при температуре $100-125^{\circ}\text{C}$ и криогенных температурах, когда требуется высокая жесткость и повышенная прочность при сжатии. Сплав МА17 находит применение в радиотехнической промышленности для изготовления звукопроводов ультразвуковых линий задержки.

Сплав МА2-2 используется в полиграфической промышленности для изготовления клише. Внедрение его повышает прочность клише, увеличивает их тиражеустойчивость, сокращает время травления и повышает производительность машин.

Сплавы МЛ16, МЛ16пч, МЛ16вч, МЛ4вч используются в качестве протекторов с высокой коррозионной стойкостью, которая обеспечивается путем глубокой очистки магния от вредных примесей железа, никеля, меди и кремния. Применение их в магистральных газо- и нефтепроводах, а также для защиты подводной части корпусов судов значительно удлиняет срок службы защищаемых объектов.

Сплав МЦИ предназначен для литья деталей, работающих в условиях воздействия вибрационных нагрузок. Демпфирующая способность этого сплава в несколько десятков раз выше, чем магневых сплавов, используемых в качестве конструкционных сплавов.

Титановые сплавы - обладают высокими прочностью и жаропрочностью при достаточно хорошей пластичности, высокой коррозионной стойкости и малой плотности.

По технологии изготовления титановые сплавы подразделяются на деформируемые, литейные и порошковые, по механическим свойствам - на сплавы нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные, повышенной пластичности. По способности упрочняться с помощью термической обработки они делятся на упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой; по структуре в отожженном состоянии они классифицируются на α -, псевдо- α , $\alpha+\beta$, псевдо- β и β -сплавы.

Область применения титановых сплавов:

малопрочные высокопластичные:

ВТ1-00 - слабонагруженные детали сложной конфигурации, работающие при температуре от -253°C до 150°C ;

ВТ-0, ОТ4-0 - детали сложной конфигурации, работающие длительно при температуре $300-350^{\circ}\text{C}$ и кратковременно при температуре до $500-600^{\circ}\text{C}$;

ОТ4-1 - тонкостенные детали сложной формы, работающие длительно до температуры 300⁰С (3000 ч) и 350⁰С (2000 ч);

среднепрочные:

ОТ4 - детали, длительно работающие до температуры 350-400⁰С;

ВТ5 - сварные детали, работающие при температуре от -253 до 400⁰С;

ВТ5-1 - штампосварные детали и узлы, работающие до 450⁰С;

ВТ20- детали, длительно работающие до 500⁰С;

ПТ7М- трубы и другие тонкостенные сварные детали;

высокопрочные:

ВТ3-1- кованные и штампованные детали, работающие при температуре до 400⁰С (6000 ч) и 450⁰С (2000 ч);

ВТ6 - штампосварные детали, длительно работающие до температуры 400-450⁰С;

ВТ14 - детали, длительно работающие до температуры 400⁰С;

ВТ16 - крепежные и резьбовые детали диаметром 40 мм, работающие до температуры 350⁰С;

ВТ22 - детали, длительно работающие при 350⁰С;

ВТ9 - детали, работающие до температуры 500⁰С.

Применение титановых сплавов.

В авиастроении, ракетостроении - каркасные детали, обшивка, топливные баки, детали реактивных двигателей, диски и лопатки компрессоров, детали воздухозаборника, детали корпусов ракетных двигателей второй и третьей ступени и т.д.

В судостроении - обшивка корпусов судов и подводных лодок, сварные трубы, гребные винты, детали насосов и др.

В химической промышленности - реакторы для агрессивных сред, насосы, змеевики, центрифуги и др.

В гальванотехнике - ванны для хромирования, анодные корзины, теплообменники, трубопроводы, подвески и др.

В криогенной технике - детали холодильников, насосов компрессоров, теплообменники и др.

В пищевой промышленности - сепараторы, холодильники, емкости для продуктов, цистерны и др.

В медицинской промышленности - инструмент, наружные и внутренние протезы, внутрикостные фиксаторы, зажимы и др.

Бериллиевые сплавы - сплавы на алюминий-бериллиевой основе высокомодульные и по модулю упругости в зависимости от состава превосходят высокопрочные сплавы на алюминиевой основе более чем

в 2-3 раза. **Модуль упругости** - аддитивное свойство, приблизительно определяемое среднеарифметическим значением модуля упругости компонентов, входящих в состав сплава. Этим объясняется высокий рост модуля упругости при введении бериллия в больших количествах в указанные сплавы. Широкое применение имеет *бериллиевая бронза* - сплав меди с бериллием. При введении в медь 2% бериллия прочность многократно повышается. Они коррозионно- стойки в морской воде, в водном растворе соляной кислоты.

Наряду с ценными техническими свойствами бериллий и его соединения обладают резко выраженными токсическими свойствами. Наиболее токсичными являются химические соединения бериллия, особенно хлористые и фтористые. Аэрозоли и мелкодисперсные частицы бериллия, его сплавов и соединений воздействуют на дыхательные пути и могут привести к заболеванию бериллозом, а их попадание на кожу может вызывать поражение кожного покрова и слизистых оболочек (дерматиты, экземы, конъюнктивиты). В компактном виде бериллий безвреден. В окружающую среду частицы бериллия могут попадать при плавке, изготовлении порошков, обработке резанием, сварке, шлифовании, полировании. Предельно допустимое содержание бериллия в воздушной среде производственных помещений - $0,001 \text{ мг/м}^3$. Сочетание высокого модуля упругости, теплопроводности, малой плотности и других характеристик обусловили применение бериллия и его сплавов в ряде изделий авиаракетной техники, в том числе для тормозов самолетов и теплозащитных экранов при вхождении возвращаемых летательных аппаратов в плотные слои атмосферы, в приборах, в зеркалах, замедлителях и отражателях тепловых нейтронов, материалах оболочек тепловыделяющих элементов атомных реакторов.

В таких конструкциях, как системы наведения, тормоза и зеркала бериллий не имеет конкуренции и может превосходить по эффективности использования даже лучшие композиционные материалы. Бериллий широко используется в качестве небольших присадок в алюминиевых сплавах для создания защитной пленки на жидком металле, в стали для образования твердого диффузионного слоя. Сплавы меди с бериллием (бериллиевые бронзы) обладают эффектами термической обработки; они немагнитны, не искрят при ударе, имеют хорошую коррозионную стойкость, достаточно высокую прочность, а в закаленном состоянии высокую пластичность.

Полимерные материалы - обладают низкой плотностью, высокой удельной прочностью и жесткостью, химической и радиационной стойко-

стью, а также стабильными электрическими свойствами в определенном интервале температур; используются как в чистом виде без наполнителей, так и в виде матриц полимерных композиционных материалов.

Удельная прочность - это отношение временного сопротивления к произведению плотности на ускорение свободного падения. Если, например, для улучшенной стали 40Х удельная прочность равна 13 км, то для титанового сплава после термической обработки она увеличивается до 31 км, а для алюминия, армированного борным волокном, - до 41 км. Таким образом, повышение удельной прочности приводит к значительному сокращению материалоемкости изделий.

Полиэтилен, полипропилен и политетрафторэтилен (фторопласт) имеют очень высокую пластичность, объединяющую их в одну группу. Полипропилен отличается высокой стойкостью к многократным изгибам, износостойкостью и менее подвержен растрескиванию под действием агрессивных сред. Фторопласт обладает низким коэффициентом трения, наиболее химически стоек из всех полимеров, имеет повышенную термо- и хладостойкость. Общими недостатками полимеров данной группы являются: невысокая теплостойкость, ползучесть под действием нагрузки и зависимость механических свойств от температуры, длительности нагружения и скорости деформирования. Полимеры, успешно конкурирующие с металлами при изготовлении деталей конструкций повышенной и коррозионной стойкости: полистирол, полиметиленаксид, полиэтилентерефталат (лавсан), поликарбонат и др. Высоким временным сопротивлением (120-140 МПа), высокими пластичностью и сопротивлением усталости, низкой ползучестью под нагрузкой обладают полиамиды.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы относятся к классу порошковых, в которых матрица из металла или сплава упрочняется искусственно введенными мелкодисперсными частицами размером менее 0,1 мкм в количестве 0,1-15 %. В качестве упрочняющей фазы используют дисперсные частицы оксидов, карбидов, нитридов, боридов и других тугоплавких соединений. В качестве основы - алюминий, бериллий, магний, никель, кобальт, хром. Достигают необходимой прочности и пластичности, а также других свойств в соответствии с назначением.

Волокнистые металлические композиционные материалы. Наиболее широкое применение в качестве матрицы композиционного материала получил алюминий, так как именно он определяет в первую

очередь те самые удельные (т.е. отнесенные к плотности) характеристики, благодаря которым эти материалы считаются перспективными во многих областях.

Эвтектические композиционные материалы (ЭКМ) - сплавы эвтектического или близкого к эвтектическому состава, в которых упрочняющей фазой служат ориентированные кристаллы, образующиеся в процессе направленной кристаллизации.

Структура эвтектических композиционных материалов, создаваемая естественным путем, а не в результате искусственного введения армирующей фазы в матрицу, обладает высокой прочностью, термической стабильностью до температур, близких к температуре плавления эвтектики, и лишена многих недостатков, связанных с химической совместимостью между матрицей и упрочняющей фазой искусственных композиционных материалов.

Из эвтектических композиционных материалов изделия можно получить за одну операцию, исключая трудоемкие процессы изготовления армирующих волокон, введение и ориентацию их в матрице.

К недостаткам эвтектических композиционных материалов относятся повышенные требования к чистоте исходных материалов, зависимость свойств от скорости процесса направленной кристаллизации и ограниченная возможность изменения объемного содержания армирующей фазы, которое определяется в основном диаграммой состояния системы.

ЭКМ на основе алюминия применяются как в качестве конструкционного материала, так и для изготовления высокопрочных электрических проводов и контактов выключателей, благодаря низкому электросопротивлению - близкому к электросопротивлению алюминия.

ЭКМ на основе никеля и кобальта используют в основном для изготовления литых рабочих и сопловых лопаток, а также крепежных деталей камер сгорания газотурбинных двигателей.

ЭКМ на основе тантала и ниобия используют для изготовления деталей самолетов и ракет, работающих при повышенных температурах (лопатки двигателей, защитные кромки).

Волокнистые композиционные материалы с неметаллической матрицей. Из большого числа разработанных полимерных КМ наиболее перспективными являются КМ на основе углеродных волокон, т.е. углепластики. К основным преимуществам углепластиков следует отнести: сравнительно малую плотность, высокую статическую прочность и сопротивление усталости, жесткость, коррозионную стойкость, износостойкость.

стойкость, малый коэффициент температурного расширения и электропроводность.

6. МАТЕРИАЛЫ УСТОЙЧИВЫЕ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВНЕШНЕЙ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ [41-51]

Коррозионно-стойкие материалы разделяются на две основные группы: металлические сплавы и неметаллические материалы. Металлические - представляют собой двух- или многокомпонентные системы, обладающие стойкостью против общей коррозии или локальных видов коррозии, в том числе многокристаллитной, точечной, коррозионного растрескивания и др. Основой промышленных коррозионно-стойких сплавов является железо (стали), титан, никель, медь, алюминий; в отдельных случаях - тугоплавкие и благородные материалы.

Более высокая стойкость (по сравнению с обычными углеродистыми и низколегированными сталями) на первом периоде работы достигается образованием поверхностных пленок, содержащих оксиды хрома - фосфиды, а при продолжительных сроках - накоплением на поверхности металла - меди.

К неметаллическим материалам относят полимерные, минеральные материалы, а также резины и эбониты.

Природные каменные материалы (гранит, диорид, спенит, апдезит, бештаунит, базальт, кварцит, габбро, порфирит) обладают при нормальной температуре высокой кислотостойкостью, удовлетворительной щелочестойкостью, малым водопоглощением. Обычно каменные природные материалы используют в виде штучных изделий простой формы. Из расплавов каменного сырья получают фасонные изделия, даже трубы, а также волокно.

К искусственным минеральным материалам относят: кислотоупорный кирпич (ГОСТ 474-80), кислото- и термокислотоупорные плитки, шамотный кирпич, кварцевое (ГОСТ 16548-80) и силикатное (ГОСТ 8688-77) стекло, ситаллы и шлакоситаллы. Для изготовления тонкой химической аппаратуры, в том числе промышленной, контактирующей с высокоагрессивными средами, применяют кварцевое и силикатное стекло в виде труб диаметром до 300 мм, змеевиков, плит, фасонных изделий. Коррозионная стойкость кварцевого и силикатного стекла примерно одинакова, они устойчивы практически во всех минеральных и органических кислотах до 80°C, кроме плавиковой кислоты при комнатной температуре, фосфорной при высокой температуре. Кварцевое стекло имеет значительно более высокую термостойкость по сравнению с силикатным.

Ситаллы и шлакоситаллы являются кристаллическими стеклами, которые получают с помощью специальной термической обработки. Они имеют высокую коррозионную стойкость в серной, соляной, азотной, фосфорной, уксусной кислотах. Эти материалы чаще всего применяются в качестве футеровочных плиток. Стекла имеют относительно низкую плотность (около $2,5 \text{ г/см}^3$) и высокое временное сопротивление при сжатии ($200\text{-}250 \text{ кг/мм}^2$), т.е. обладают высокой удельной прочностью, превышающей в 5-6 раз удельную прочность таких материалов, как сталь и титан. Поэтому если конструктивные элементы поставить в условия, при которых в них будут возникать только сжимающие напряжения, то оптимальным материалом для изготовления таких конструкций, обладающих минимальным весом, следует считать стекло или ситалл.

Резины и эбониты изготавливают на основе натурального или синтетического каучука. Резиновая смесь представляет собой композицию из каучука и серы. С повышением содержания серы в каучуке изменяется твердость резины: от мягкой резины до эбонита. Кроме серы, резиновые смеси содержат наполнители, ускорители и активаторы вулканизации и другие добавки. Резиновые смеси и эбониты используют в технике как коррозионно-стойкие уплотнительно-прокладочные материалы и в качестве антикоррозионной обкладки аппаратуры.

Теплостойкие материалы - такие материалы, которые способны работать в нагруженном состоянии при температурах до 600°C в течение определенного времени.

Наиболее распространенным жаропрочным материалом является жаропрочная сталь, что объясняется ее невысокой стоимостью и хорошими технологическими свойствами. По масштабам применения она занимает ведущее место при температурах $500\text{-}700^\circ \text{C}$. При температурах ниже 450°C целесообразно использовать обычные конструкционные стали.

Жаростойкие материалы. Способность материалов сопротивляться газовой коррозии в процессе обработки и эксплуатации при высоких температурах называют **жаростойкостью**. Основные жаростойкие сплавы созданы на основе железа и никеля. Широкое применение в промышленности находит жаростойкий чугун как наиболее дешевый и доступный материал (сопротивляется окислению).

Жаропрочные материалы рассчитаны на длительную (до 10^5 г) службу при $650\text{-}700^\circ \text{C}$. Общим недостатком тугоплавких металлов (таких, как тантал, ниобий) является низкая жаростойкость, исключающая возможность использования их в качестве жаропрочных материалов без

специальных защитных покрытий (успешно работают в вакууме и в атмосфере инертных газов).

Радиационно-стойкие материалы. При облучении потоками частиц (нейтронов, протонов, электронов, альфа-частиц, остатков деления) и жестким электромагнитным (гамма и рентгеновским) излучением в материалах образуются структурные повреждения, называемые радиационными дефектами. Переданная материалу твердых частиц тела энергия элементарных частиц или излучения частично расходуется на разрыв межатомных связей, в результате чего образуются вакансии и включения, а затем и целый их каскад. Радиационно-стойкие материалы создаются на основе бериллия, магния, циркония, алюминия, коррозионно-стойких сталей, никелевых сплавов, керамики, графита.

Материалы для криогенной техники. Основными требованиями к сталям и сплавам, работающим при низких температурах, являются следующие:

- малая чувствительность к хрупкому разрушению при низких температурах, определяемая запасом пластичности и вязкости;
- высокая прочность при 20°C, которая определяет надежность и металлоемкость конструкций, а также количество хладагента, требуемого для их захлаживания;
- технологичность при металлургическом и машиностроительном переделе.

При решении вопроса о пригодности материала по механическим свойствам обычно определяют предел текучести, относительное удлинение и сужение на гладких образцах с концентратором напряжений в виде надреза или трещины, ударную вязкость, порог хладноломкости, критерии Ирвина K_{1C} и G_{1C} , критическое раскрытие трещины. Широко используются стали различных классов, сплавы на основе алюминия, меди, реже титана.

7. МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ [52-55]

а) Материалы высокой проводимости применяют в электротехнике, приборостроении для изготовления обмоточных и монтажных проводов, различного рода токоведущих частей и т.п.

Эти материалы должны обладать следующими свойствами: малым удельным электрическим сопротивлением, высокими механическими свойствами, хорошими технологическими параметрами и стойкостью против окисления. Это - медь, бронзы, латуни, алюминий, серебро, золото, вольфрам и т.д.

б) Сверхпроводники. Сверхпроводимость - явление, заключающееся в том, что электрическое сопротивление некоторых материалов исчезает при уменьшении температуры ниже некоторого значения, зависящего от материала и от магнитной индукции. **Сверхпроводник** (ГОСТ 19880-74)- вещество, основным свойством которого является способность при определенных условиях быть в состоянии сверхпроводимости при некоторой критической температуре (T_c). Токи, созданные в сверхпроводящих кольцах, протекают без измеримого изменения в течение года после их начального возбуждения. Крупномасштабное применение сверхпроводимости связано с уменьшением массы и габаритов магнитных систем, уменьшением энергетических затрат при получении магнитных полей высокой напряженности. Известно более 1000 сверхпроводящих сплавов и число их постоянно растет.

в) Резистивные материалы. Материалом высокого электрического сопротивления (резистивным) называют проводниковый материал с удельным электрическим сопротивлением при нормальных условиях не менее $0,3 \cdot 10^{-8}$ (Ом*м). По области применения - три основные группы: 1) материалы для резисторов (медные, медно-никелевые, никелевые, никель-хромовые, пленочные, проволочные, углеродистые); 2) материалы для термоэлектродов, термопар и удлиняющих проводов (сплавы на основе Ni, Cu-Ni, Pt, Pt-Rh, W-Re, неметаллические порошковые материалы); 3) материалы для нагревателей (сплавы на основе Ni-Cr, Fe-Cr-Al, порошковые керамические материалы).

Кроме того, различают: магнитотвердые и магнитомягкие материалы, материалы с особыми тепловыми свойствами, полупроводниковые материалы, аморфные металлические сплавы, диэлектрические материалы, лазерные материалы.

8. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ [56-60]

- **Материалы для обработки резанием** (углеродистые и легированные инструментальные стали, быстрорежущие стали, твердые сплавы на основе карбидов вольфрама и титана, сверхтвердые материалы). Наибольший объем снимаемой стружки приходится на инструмент из твердых сплавов и быстрорежущих сталей.

- **Углеродистые инструментальные стали.** Углеродистые стали применяют для изготовления режущих инструментов, работающих в условиях, не вызывающих нагрева рабочей кромки свыше $150-200^{\circ}\text{C}$. Они используются также для штамповых и измерительных инструментов. Основные достоинства углеродистых сталей - получение высокой твердости в поверхностном слое при сохранении вязкой сердцевины.

Это в ряде случаев обеспечивает минимальную поводку инструмента и повышение его механических свойств; низкую твердость в отожженном состоянии НВ 1800-2000 М Па, позволяющую использовать высокопроизводительные методы изготовления инструмента (накатку, насечку); закалку с низких температур (770-820⁰С); получение после закалки малых количеств остаточного аустенита, что обеспечивает им повышенное сопротивление пластической деформации; сохранение чистой поверхности при закалке вследствие охлаждения в воде, что упрощает очистку инструментов; низкую стоимость. Вместе с тем недостатки углеродистых сталей ограничивают область их применения: вследствие низкой теплостойкости - способности сохранять твердость лишь при нагреве до температур, не превышающих 170-200⁰С. Меньшая прочность по сравнению с быстрорежущими сталями связана с получением более крупного зерна (8-9 балл) при оптимальных температурах закалки. Склонность к росту зерна при незначительных перегревах при закалке приводит к снижению механических свойств. Ограниченная технологическая закалываемость требует применения высоких скоростей охлаждения в перлитном интервале, что приводит к неоднородной твердости, особенно у инструментов небольшой толщины, а также к большой поводке и термическим трещинам. Стали нельзя применять для относительно крупных инструментов (диаметром или толщиной больше 30 мм), если они предназначены для работы при повышенных давлениях. Углеродистые стали используют для инструментов, не подвергаемых в процессе работы нагреву до температур свыше 150-200⁰С и не требующих в процессе изготовления значительного шлифования (напильники, метчики, развертки, ножовки, топоры, колуны, стамески, слесарно-монтажные и хирургические инструменты), а также для некоторых штамповых и измерительных инструментов. Назначение углеродистых инструментальных сталей У7, У7А, У8, У8А, У9, У9А, У10, У10А, У11, У11А, У12, У12А, У13, У13А см. [10, 57, 58].

- *Легированные стали для режущего и измерительного инструмента.* По характеру легирования, свойствам и областям применения стали можно разделить на две группы: 1) небольшой прокаливаемости (7ХФ, 8ХФ, 9ХФ, 11ХФ, 13Х, ХВ4, ХВ5); 2) повышенной прокаливаемости (9Х, Х, 9ХС, ХГС, 12Х1, 9ХВГ, ХВГ, ХВСГ). Стали, входящие в первую группу, по устойчивости переохлажденного аустенита превосходят углеродистые стали У7-У13, но благодаря легированию хромом (0,2-0,7%), ванадием (0,15-0,3%) и вольфрамом (до 4%) имеют повышенные устойчивость против перегрева, износостойкость и теплостойкость. Так же, как и углеродистые стали У7-У13, они после термической

обработки содержат мало остаточного аустенита, что обеспечивает им высокий предел текучести. Большинство из этих сталей с успехом используют при изготовлении инструментов, подвергаемых поверхностной (местной) закалке. Некоторые из сталей небольшой прокаливаемости имеют специализированное применение: сталь 13X предназначена главным образом для бритвенных ножей, лезвий, хирургического и гравировального инструмента; сталь ХВ4 рекомендуется для резцов и фрез, используемых для обработки резанием с небольшими скоростями материалов высокой твердости; сталь В2Ф используется для изготовления ленточных пил и ножовочных полотен для резки конструкционных сталей средней твердости.

Стали второй группы имеют более высокое содержание хрома (0,8-1,7%), наряду с которым в ряде марок присутствует марганец, кремний, вольфрам. Комплексное легирование даже относительно небольшими количествами элементов существенно повышает прокаливаемость, способствует увеличению дисперсности и однородности распределения карбидов (за исключением сталей типа ХВГ), уменьшает чувствительность к перегреву, способствует сохранению более мелкого зерна при закалке. Стали повышенной прокаливаемости применяют для изготовления инструментов больших сечений, охлаждаемых при закалке в масле или горячих средах. Указанные особенности сталей второй группы (9ХС, ХГС, ХВГ, ХВСГ) позволяют использовать их для изготовления режущего (метчики, плашки, развертки, фрезы, протяжки), а также штампового инструмента более ответственного назначения, чем из углеродистых и низкопрокаливающихся сталей. Отличительной особенностью марганецсодержащих сталей (ХВГ, ХВСГ, 9ХВГ) является их малая деформируемость при термической обработке, обусловленная повышенным содержанием остаточного аустенита. Это позволяет рекомендовать их для изготовления тех инструментов, к которым предъявляются жесткие требования относительно стабильности размеров при термической обработке. Недостатком указанных сталей является повышенная склонность к образованию карбидной сетки по границам зерен в результате выделения карбидов в процессе замедленного охлаждения после горячей пластической деформации или высокотемпературного нагрева. Режимы окончательной термической обработки легированных инструментальных сталей см. [10, 57, 58]. Их назначение см. [10, 56, 58].

- *Быстрорежущие стали* - наиболее характерные для режущих инструментов. Они сочетают высокую теплостойкость (600-650⁰С в зависимости от состава и обработки) с высокими твердостью (до HRC 68-70), износостойкостью при повышенных температурах и повышенным

сопротивлением пластической деформации. Быстрорежущие стали позволяют повысить скорость резания в 2-4 раза по сравнению со скоростями, применяемыми при обработке инструментами из углеродистых и легированных инструментальных сталей. Быстрорежущие стали широко применяют для режущих инструментов, работающих в условиях значительного нагружения и нагрева рабочих кромок. Инструмент из быстрорежущих сталей обладает достаточно высокой стабильностью свойств, что особо важно в условиях гибкого автоматизированного производства. В зависимости от химического состава, а следовательно, и уровня основных свойств быстрорежущие стали подразделяют на стали нормальной и повышенной теплостойкости (производительности). Это стали P18, P9, P6M5. Быстрорежущие стали с более высоким содержанием ванадия, а также дополнительно легированные кобальтом относят к сталям повышенной теплостойкости (P12Ф3, P6M5Ф3, P18K5Ф2, P9K5, P6M5K5, P9M4K8 и др.). По сравнению со сталями нормальной производительности высокованадиевые стали повышенной производительности обладают в основном повышенной износостойкостью из-за наличия высокотвердого карбида типа MC, а кобальтсодержащие стали - более высокими вторичной твердостью, теплостойкостью и теплопроводностью. Режимы окончательной термической обработки и свойства быстрорежущих сталей нормальной и повышенной теплостойкости см. [10, 57, 58]; примерное их назначение см. [10, 58].

- *Твердые сплавы.* Спеченные твердые сплавы представляют собой гетерогенные материалы, состоящие из зерен высокотвердых тугоплавких соединений (карбидов, реже нитридов или боридов переходных металлов), цементированных пластичным металлом - связкой. В качестве тугоплавкой фазы твердых сплавов наиболее широко используются карбиды вольфрама, титана, тантала, хрома или их смеси, а в качестве связки - кобальт, никель, реже железо и их сплавы. Для характеристики областей применения различных марок твердых сплавов принята международная классификация, в соответствии с которой все сплавы делятся на группы в зависимости от обрабатываемого материала. Внутри группы сплавы подразделяются по конкретным условиям применения. Сплавы для обработки резанием материалов, дающих сливную стружку (сталь, ковкий чугун), обозначаются буквой Р; для материалов, дающих дробленную стружку (серый чугун, цветные металлы и их сплавы, неметаллические материалы), - буквой К и так называемые универсальные сплавы, т.е. пригодные для обработки как сталей, так и чугунов, - буквой М. Подгруппы сплавов внутри каждой из групп для конкретных условий резания обозначают двузначной цифрой, прибавляемой к соответствующей

букве, например P01, P10, P20. Возрастание цифр указывает на повышение прочностных свойств сплавов и снижение их твердости, износостойкости при одновременном снижении скорости резания. Область применения твердых сплавов для обработки материалов резанием см. [60].

- *Сверхтвердые материалы.* К сверхтвердым относят материалы, твердость и износостойкость которых превышает твердость и износостойкость твердых сплавов на основе карбидов вольфрама и титана с кобальтовой связкой и карбидтитановых сплавов на никельмолибденовой связке. В промышленности применяют инструменты из таких сверхтвердых веществ, как алмаз, нитрид бора, оксид алюминия и нитрид кремния, в монокристалльной форме или в виде порошков и спеков порошков в качестве лезвийного инструмента, шлифовальных кругов, паст и др. По твердости сверхтвердые материалы подразделяют на пять подклассов: природные алмазы (HV 98,1 Г Па); синтетические алмазы (HV 88,29-98,1 Г Па); кубический нитрид бора (HV 68,67-78,48 Г Па); гексагональный нитрид бора (HV 49,05-78,48 Г Па); композиционные материалы (HV до 49,05 Г Па).

- *Штамповые стали для холодного деформирования.* По условиям работы стали можно разделить на четыре группы: 1) высокой и повышенной износостойкости; 2) высокого сопротивления смятию и высокой теплостойкости; 3) высокопрочные с высокой и повышенной ударной вязкостью; 4) для ударных инструментов. Рекомендуемые области применения сталей высокой износостойкости см. [10, 57-60], сталей второй группы - см. [57], третьей группы - [58], четвертой группы - [58, 59]. Основные причины выхода из строя и средняя стойкость штамповых инструментов для основных операций холодной штамповки указаны в [10, 58].

- *Штамповые стали для горячего деформирования.* Основные причины потери работоспособности штампов горячего деформирования - износ, смятие и разгар. Чтобы обеспечить необходимую стойкость инструмента, стали для горячего деформирования должны иметь: 1) теплостойкость, обеспечивающую необходимое сопротивление пластической деформации (предел текучести, твердость) для сохранения формы гравюры при рабочих температурах; 2) вязкость, особенно при работе с динамическими нагрузками; 3) износостойкость; 4) разгаростойкость, т.е. сопротивление термической и термомеханической усталости; 5) окислительную стойкость, определяющую скорость окислительного износа, особенно выше 600°C; 6) прокаливаемость для достижения равнопрочности по сечению. Любое решение о необходимом сочетании показателей свойств материала штампа является компромиссным. Правильным будет

решение, учитывающее конкретные условия работы инструмента и даже ограниченного участка гравюры, которые определяют преобладающий вид повреждения. Рекомендуемые области применения сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости, а также сталей повышенной теплостойкости и вязкости см. [10, 59].

ЛИТЕРАТУРА

1. Конструкционные материалы: Справочник /Под общ. ред. Б.Н.Арзамасова. - М.: Машиностроение, 1990. - 688 с.
2. *Журавлев В.Н., Николаева О.И.* Машиностроительные стали: Справочник. - 3-е изд. - М.: Машиностроение, 1981. - 391 с.
3. Справочник металлста: В 5 т. - М.: Машиностроение, 1976.
4. *Бобро Ю.Г.* Легированные чугуны. - М.: Металлургия, 1976. - 288 с.
5. *Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В.* Промышленные цветные металлы и сплавы. - М.: Металлургия, 1974. - 488 с.
6. *Пастухова Ж.П., Рахитадт А.Г.* Пружинные сплавы цветных металлов. - М.: Металлургия, 1984. - 364 с.
7. *Богачев И.Н.* Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы. - М.: Металлургия, 1972. - 189 с.
8. *Бородин И.Н.* Упрочнение деталей композиционными покрытиями. - М.: Машиностроение, 1982. - 141 с.
9. *Власов В.М.* Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей. - М.: Машиностроение, 1987. - 304 с.
10. *Геллер Ю.А.* Инструментальные стали. - М.: Металлургия, 1983. - 527 с.
11. *Гнесин Г.Г.* Карбидкремниевые материалы. - М.: Металлургия, 1977. - 277 с.
12. Износостойкость и структура твердых наплавов /М.М.Хрущов, М.А.Бабичев, Е.С.Беркович и др. - М.: Машиностроение, 1971. - 96 с.
13. *Истомин Н.П., Семенов А.П.* Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров. - М.: Наука, 1981. - 148 с.
14. *Мовчан Б.А., Малащенко И.С.* Жаростойкие покрытия, осажденные в вакууме. - Киев: Наукова думка, 1983. - 231 с.
15. *Мошков А.Д.* Пористые антифрикционные материалы. - М.: Машиностроение, 1968. - 207 с.

16. Мур Д. Основы применения трибоники. - М.: Мир, 1978. - 487 с.
17. Полимеры в узлах трения машин и приборов: Справочник /Е.В.Зиновьев, А.Л.Левин, М.М.Бородулин, А.В.Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 1988. - 328 с.
18. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар /Под ред. И.В.Крагельского. - М.: Наука, 1979. - 268 с.
19. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения. - М.: Металлургия, 1976. - 600 с.
20. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. - М.: Машиностроение, 1976. - 271 с.
21. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. - М.: Машиностроение. - Кн. 1, 1978. - 400 с. - Кн. 2, 1979. - 358 с.
22. Федорченко И.М., Крячек В.М., Панаиоти И.И. Современные фрикционные материалы. - Киев: Наукова думка, 1976. - 334 с.
23. Энциклопедия неорганических материалов. - Киев: Главная редакция УСЭ, 1977. - Т. 1. - 840 с.; - Т. 2. - 814 с.
24. Прецизионные сплавы: Справочник. - М.: Металлургия, 1974, 1980. - 442 с.
25. Рахитадт А.Г. Пружинные стали и сплавы. - М.: Металлургия, 1980. - 400 с.
26. Алюминиевые сплавы / Под ред. В.И.Елагина, В.А.Ливанова. М.: Металлургия, 1984. 407 с.
27. Анцифоров В.Н., Устинов В.С., Олесов Ю.Г. Спеченные сплавы на основе титана. - М.: Металлургия, 1984. - 167 с.
28. Бериллий. Наука и технология. - М.: Металлургия, 1984. - 110 с.
29. Бибиков Е.Л., Глазунов С.Г., Неуструев А.А. и др. Титановые сплавы. Производства фасонных отливок из титановых сплавов. - М.: Металлургия, 1983. - 296 с.
30. Волокнистые композиционные материалы /Под ред. Дж.Уитона, Э.Скала. - М.: Металлургия, 1988. - 42 с.
31. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. - М.: Металлургия, 1974. - 366 с.
32. Дриц М.Е., Елкин Ф.М., Гурьев И.Н., Бондарев Б.И. и др. Магниеволитиевые сплавы. - М.: Металлургия, 1980. - 140 с.
33. Кишкина С.И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. - М.: Металлургия, 1981. - 280 с.
34. Колачев Б.А., Мальков А.В. Физические основы разрушения титана. - М.: Металлургия, 1983. - 160 с.
35. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова А.А. Механические свойства титана и его сплавов. - М.: Металлургия, 1974. - 542 с.

36. Композиционные материалы: Справочник /Под ред. Д.М.Карпиноса. - Киев: Наукова думка, 1985.
37. Магниеые сплавы: Справочник /Под ред. М.Б.Альтмана, М.Е.Дрица, М.А.Тимоновой, М.В.Чухрова. - М.: Металлургия, 1978. - Ч. 1. - 232 с.
38. Магниеые сплавы: Справочник /Под ред. И.И.Гурьева, М.В.Чухрова. - М.: Металлургия, 1978. - Ч. 2. - 296 с.
39. *Рачев Х., Стефанов С.* Справочник по коррозии. - М.: Мир, 1982. - 91с.
40. *Фридляндер И.Н.* Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. - М.: Металлургия, 1979. - 209 с.
41. *Баннх О.А., Ковнеристый Ю.К., Зудин И.Ф.* Хромомарганцевые теплоустойчивые стали с алюминием. - М.: Наука, 1965. - 103 с.
42. *Бобылев А.В.* Механические и технологические свойства металлов: Справочник. - М.: Металлургия, 1987. - 208 с.
43. *Жук Н.П.* Курс теории коррозии и защиты металлов. - М.: Металлургия, 1976. - 472 с.
44. *Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г.* Циркониевые сплавы в атомной энергетике. - М.: Энергоиздат, 1981. - 232 с.
45. *Захаров М.В., Захарова А.М.* Жаропрочные сплавы. - М.: Металлургия, 1972. - 384 с.
46. Конструкционные материалы ядерных реакторов /Под общ. ред. Н.М. Бекоровайного. - М.: Атомиздат, 1977. - 256 с.
47. *Масленков С.Б.* Жаропрочные стали и сплавы. - М.: Металлургия, 1983. - 192 с.
48. *Солнцев Ю.П., Степанов Г.А.* Материалы в криогенной технике: Справочник. - Л.: Машиностроение, 1982. - 312 с.
49. Тугоплавкие и редкие металлы и сплавы: Справочник. - М.: Металлургия, 1977. - 240 с.
50. *Ульянин Е.А., Свистунова Т.В., Левин Ф.Л.* Коррозионно-стойкие сплавы на основе железа и никеля. - М.: Металлургия, 1986. - 262 с.
51. *Щедров К.П., Гакман Э.Л.* Жаростойкие материалы: Справочное пособие. - М.-Л.: Машиностроение, 1965. - 166 с.
52. *Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М.* Электротехнические материалы. - Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1985. - 304 с.
53. *Головин С.А., Пушкар А.А., Левин Д.М.* Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. - М.: Металлургия, 1987. - 192 с.

54. Калинин Н.Н., Скибинский Г.Л., Новиков П.П. Электрорадио-материалы. - М.: Высшая школа, 1981. - 293 с.
55. Электротехнические материалы: Справочник /В.Б.Березин, Н.С.Прохоров, Г.А.Рыков, А.М.Хайкин. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.
56. Артингер И. Инструментальные стали и их термическая обработка. - М.: Metallurgy, 1982. - 312 с.
57. Гуляев А.П., Малинина К.А., Саверина С.М. Инструментальные сплавы: Справочник. - М.: Машиностроение, 1975. - 272 с.
58. Инструментальные стали: Справочник /Л.А.Позняк, С.И.Тишаев, Ю.М.Скрынченко и др. - М.: Metallurgy, 1977. - 168 с.
59. Позняк Л.А., Скрынченко Ю.М., Тишаев С.И. Штамповые стали. - М.: Metallurgy, 1980. - 244 с.
60. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник /Под ред. И.М.Федорченко. - Киев: Наукова думка, 1985. - 624 с.

Составитель Б.А.Рычков

КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методическое пособие

Редактор Л.М.Стрельникова
Технический редактор Э.К.Гаврина
Корректор О.А.Матвеева
Компьютерная верстка Е.Г.Шевёлкина

Подписано к печати 17.10.2000. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Офсетная печать. Объем 2,75 п.л.
Тираж 100 экз. Заказ 134.

Издательство Славянского университета

Отпечатано в типографии КРСУ, г.Бишкек, ул.Шопокова, 68.