Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины

Донбасская государственная машиностроительная академия

Кафедра «Технология и оборудование литейного производства»

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

по дисциплине

«Литые износостойкие материалы»

для студентов специальности 6.050402

дневной и заочной формы обучения

Утверждено на заседании кафедры ТОЛП

протокол № 2 от28.08.2012 г.

Краматорск, 2012

**ТЕМА 1. ПРОЦЕСС ИЗНАШИВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ**

МЕХАНИЗМ ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПАР ТРЕНИЯ И РАБОЧИХ ОРГАНОВ МАШИН

Основные понятия

Пара трения — совокупность двух подвижно сопрягающихся по­верхностей деталей (образцов) в реальных условиях службы или испыта­ний. Помимо материала, формы контактирующихся поверхностей, отно­сительного их перемещения, пара трения характеризуется окружающей средой, в том числе видом смазочного материала. Пара трения образует­ся соприкасающимися поверхностями деталей, входящих в машинный узел; с такой точки зрения зубья ковша экскаватора и грунт в совокупнос­ти не образуют пару трения. В техническом обиходе и литературе встре­чается также термин "узел трения", под которым понимают узел маши­ны, содержащий пары трения. Возможен износ поверхностей деталей, не входящих в состав пар трения, например при относительном микро­смещении соприкасающихся поверхностей деталей неподвижных соеди­нений.

Введем основные понятия, относящиеся к износу деталей и рабочих органов машин.

Изменение размеров и формы детали в результате изнашивания име­нуют износом. Его выражают в единицах длины, объема или массы.

Интенсивность изнашивания — отношение износа детали (или испытуемого образца) к пути трения или объему выполненной работы. При определении интенсивности изнашивания может оказаться более це­лесообразным относить износ к другому показателю, общему для всех узлов и агрегатов данной машины. Так, для автомобилей в качестве тако­го показатели может быть принято число километров пробега, а для трак­торов число гектаров пахоты.

Скорость изнашивания — отношение износа детали к времени, в те­чение которого проходило изнашивание.

Износостойкость оценивают величиной, обратной интенсивности или скорости изнашивания.

Предельным износом детали (узла) называют износ, при котором даль­нейшая эксплуатация становится невозможной вследствие выхода дета­ли (узла) из строя, неэкономичной или недопустимой ввиду снижения надежности механизма.

МЕХАНИЗМ ИЗНАШИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Для анализа расчленим процесс изнашивания на три явления: взаи­модействие поверхностей трения; изменения, происходящие в поверхнос­тном слое металла; разрушение поверхностей.

Эти явления не следует рассматривать как последовательные этапы они непрерывно переплетаются, взаимно влияя друг на друга. Разумеет­ся, взаимодействие поверхностей при их относительном перемещении изменяется. Точно так же разрушение поверхностей является завершаю­щим этапом их изнашивания. Тем не менее, поскольку разрушение не охватывает одновременно всю поверхность трения (оно происходит, как правило, в отдельных ее участках), другие участки претерпевают только физико-химические изменения. Частичное разрушение и изменения свойств поверхности влияют на взаимодействие поверхностей.

Взаимодействие поверхностей может быть механическим и моле­кулярным. Механическое взаимодействие выражается во взаимном внед­рении и зацеплении неровностей поверхностей в совокупности с их соударением в случае скольжения грубых поверхностей. Молеку­лярное взаимодействие проявляется в виде адгезии и схватывания. Адге­зия не только обусловливает необходимость приложения касательной силы для относительного сдвига поверхностей, но и может привести к вырывам материала. Схватывание свойственно только металлическим повер­хностям и отличается от адгезии более прочными связями. Молекуляр­ное взаимодействие возможно также на участках взаимного внедрения поверхностей. Оно обязательно будет при разрушении масляной пленки.

Хрупкость и пластичность твердого тела не являются свойствами, присущими ему независимо от напряженного состояния. При одних напряженных состояниях тело может быть плас­тичным, а при других — полухрупким или хрупким. Так, при всесторон­нем равномерном растяжении пластические деформации не развивают­ся, и материал пребывает в хрупком состоянии. При равномерном всес­тороннем сжатии большинство твердых тел может воспринимать без раз­рушения огромные нагрузки. В случае неравномерного всестороннего сжатия в зависимости от главных напряжений тела могут находиться в пластичном, хрупком или переходном состоянии.

Активным называют слой, который примыкает к контактирующей поверхности элемента пары трения и в котором могут происходить вся­кого рода физико-химические изменения, связанные с процессом трения.

Изменения на поверхностях трения обязаны деформации, по­вышению температуры и химическому действию окружающей среды.

Изменения, вызванные деформацией, заключаются в следующем.

1. Многократные упругие деформации из-за несовершенства струк­туры материала приводят в определенных условиях к усталостному вы­крашиванию поверхностей качения, а многократные упругие деформа­ции микронеровностей поверхностей скольжения разрыхляют структуру.
2. Пластическое деформирование изменяет структуру материала по­верхностного слоя. Пластическое деформирование твердых тел склады­вается из четырех наиболее важных элементарных процессов: скольже­ния по кристаллографическим плоскостям (скольжение в отдельных зер­нах поликристаллического тела происходит обычно по нескольким плос­костям, число которых возрастает с повышением напряжения); двойникования кристаллов; отклонения атомов от правильного расположения в решетке и их тепловое движение; разрушения структуры.

Разрушение структуры — это заключительный этап пластической де­формации по мере увеличения силового воздействия при однократном нагружении. Смещение кристаллических зерен сопровождается частич­ным нарушением сцепления, в результате при возрастании напряжения или многократном их повторении происходит ослабление, разрыхление, а в дальнейшем и разрыв структуры.

1. Пластическая деформация при температуре ниже температуры рекристаллизации приводит к наклепу поверхностного слоя — его уп­рочнению. Однако у самой поверхности структура несколько ослаблена, микротвердость понижена. Микротвердость достигает максимума на не­которой глубине, далее уменьшаясь до исходной.
2. При сильно отличающихся по твердости структурных составляю­щих материала и многократном воздействии нагрузки происходит внача­ле интенсивное изнашивание мягкой основы, вследствие этого повыша­ется давление на выступающие твердые составляющие, они вдавливают­ся в мягкую основу, некоторые из них дробятся и перемещаются допол­нительно под действием сил трения. В результате такого избирательного изнашивания поверхность обогащается твердыми структурными состав­ляющими и приобретает строчечную структуру.

Влияние повышения температуры.

* + 1. Если по условиям службы или в результате трения температура поверхностных слоев выше температуры рекристаллизации металла, то поверхностный слой не наклёпывается, а пребывает в состоянии повы­шенной пластичности (размягчения) — происходит выглаживание по­верхности за счет растекания всего металла или только одной составля­ющей сплава. ( например, в случае размазывания одной из разновидностей фосфидной эвтектики ).
  1. Высокая температура и пластическая деформация способствуют диффузионным процессам; в итоге возможно обогащение поверхности некоторыми элементами (например, поверхности стали углеродом), коагуляция отдельных структурных составляющих, взаимное диффузи­онное растворение материалов деталей пар трения.
  2. При интенсивном локальном повышении температуры (температур­ной вспышке) и последующем резком охлаждении поверхности окружа­ющей холодной массой металла на поверхности могут образоваться за­калочные структуры. Этому способствует высокое давление (от нагруз­ки), снижающее температуру, при которой происходят структурные превращения.
  3. Пластическая деформация, возможные высокие температурные градиенты и структурные превращения, каждое в отдельности и совмес­тно вызывают напряжения в материале, которые могут влиять на его раз­рыхление.
  4. При микроскопическом исследовании контакта деталей в условиях высоких нагрузок и температур установлена возможность образова­ния магмы-плазмы (рис. 2). Взаимодействие микроконтактов происхо­дит за очень короткое время (10-7...10-8 с), в течение которого к контакту подводится большая энергия. Для таких условий законы классической термодинамики не выполняются; материал тонкого поверхностного слоя преобразуется, в результате в зоне соударения неровностей образуется магма-плазма; процесс сопровождается эмиссией электронов.

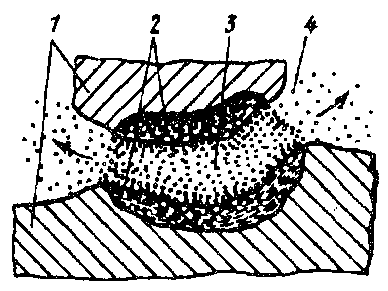


Рис. 2. Модель магмы-плазмы:1 — исходная структура; 2 — расплавленная структура; 3 — плазма; 4 — электроны, движущиеся при трибоэмиссии

Химическое действие среды заключается в следующем.

* + 1. В среде воздуха на обнаженных при изнашивании чистых метал­лических поверхностях образуются окисные пленки в результате дейст­вия кислорода газовой фазы или содержащегося в масле и его перекисях. Окисные пленки предохраняют поверхности от схватывания и связанно­го с ним глубинного вырывания и являются важным фактором не только при трении без смазочного материала и граничной смазке, но и при полу­жидкостной смазке. Опыты в вакууме, в среде азота, аргона и гелия при трении без смазочно­го материала и при граничной смазке, когда образование окисных пленок исключалось (мог­ло быть только за счет кислоро­да в масле), показали весьма высокую интенсивность изна­шивания поверхностей трения.
    2. Металлические повер­хности, взаимодействуя с хими­чески активными присадками в масле, покрываются пленками химических соединений, роль которых аналогична роли окисных пленок. Пленки эффективно защищают поверхность от изнашива­ния, если скорость их образования превышает скорость изнашивания.
    3. Возможно насыщение поверхности углеродом в результате разло­жения смазочного материала при высокой температуре.
    4. Агрессивные жидкости и газовые среды активизируют изна­шивание. Очень интенсивно разрушает поверхности водород.

Разрушение поверхностей трения, обнаруживаемое визуально или под микроскопом, происходит в виде отдельных элементарных процес­сов, сочетание которых зависит от материалов и условий трения.

Эле­ментарные виды разрушения поверхностей трения следующие.

Микрорезание. При внедрении на достаточную глубину твердая час­тица абразива или продукта износа может произвести микрорезание ма­териала с образованием микростружки. Микрорезание при трении и из­нашивании проявляется редко, так как глубина внедрения недостаточна для резания при назначаемых нагрузках.

Царапание (пластическое оттеснение). Вдавившийся участок по­верхности или частица при скольжении оттесняет перед собой и в сторо­ны и подминает под себя материал, оставляя царапину. Последняя обры­вается при выходе внедрившегося элемента из зоны фактического кон­такта, при раздроблении частицы, ее впрессовывании или уносе за пре­делы области трения. Повторное царапание по одной трассе с одной и той же интенсивностью в парах трения бывает редко, чаще происходит царапание, при котором зона пластического оттеснения перекрывает ра­нее образовавшуюся царапину. Поверхность трения покрывается цара­пинами, расположенными почти параллельно пути скольжения, а между царапинами располагается материал, претерпевший многократную плас­тическую деформацию, наклепанный и перенаклепанный, т. е. исчерпав­ший способность пластически деформироваться. При нагружении в та­ком участке легко образуются трещины, с развитием которых материал отделяется от основы. Очевидно, не только скользящие, но и перекатывающиеся частицы могут оставить на поверхности царапины. Внедрившаяся частица, упи­раясь при своем движении в твердую составляющую материала, может отклониться в сторону, и поэтому направление царапины на поверхнос­ти не следует строго направлению перемещения детали.

Отслаивание. Материал при пластическом течении может от­тесняться в сторону от поверхности трения и после исчерпания способ­ности к дальнейшему течению отслаиваться. В процессе течения матери­ал наплывает на окисные пленки и теряет связь с основой. Если при ли­нейном и точечном контакте тел напряжения по глубине слоя больше со­противления усталости материала, то при работе образуются трещины, приводящие к чешуйчатому отделению материала. Такое явление встре­чается на закаленных или цементованных деталях. Дефекты металла в виде шлаковых включений, свободного цементита и т. п. и значительные растягивающие остаточные напряжения способствуют отслаиванию.

Выкрашивание — это распространенный вид повреждения рабочих поверхностей деталей в условиях качения. Для выкрашивания характер­на произвольная форма язвинок с рваными краями. Могут выкрашивать­ся: твердые структурные составляющие сплава после того, как износится его мягкая основа; частицы белого слоя; островки основной массы серого чугуна, окаймленные графитовыми включениями; частицы антифрикци­онного металлического слоя при усталостных повреждениях; твердые окисные пленки (на железоуглеродистых и алюминиевых сплавах); час­тицы металлизационного покрытия и др.

Выкрашиванию способствуют высокие растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое после обработки, трещины после це­ментации, закалки или старения, а также значительные термические на­пряжения, возникающие при трении или вследствие неудовлетворитель­ной смазки.

Непосредственно выкрашиванию предшествует образование и раз­витие трещин, ограничивающих малые единичные объемы от остально­го материала. Таким образом, трещинообразование является составной частью процесса выкрашивания, а также отслаивания. Трещинообразо­вание из-за термических напряжений может охватить значительную пло­щадь и на определенной стадии развития трещин может даже служить браковочным признаком, поэтому оно должно рассматриваться как осо­бый вид повреждения поверхностей трения.

Глубинное вырывание возникает при относительном движении сце­пившихся тел, когда образовавшийся вследствие молекулярного взаимо­действия спай прочнее одного или обоих материалов. Разрушение про­исходит в глубине одного из тел. Поверхности разрушения у пластичных материалов представляют собой выступающие вытянутые по направле­нию движения гребни и суживающиеся в глубь материала конусы. При­легающие к местам вырывов участки пластически деформируются в боль­шей или меньшей степени. Вырванный материал остается на сопряжен­ной поверхности. Это одна из причин переноса материала при трении. Может наблюдаться процесс схватывания отдельных составляющих спла­ва, остальные составляющие уносятся в смазочный материал или уходят из зоны трения.

При изнашивании разрушение поверхностей может происходить в субмикроскопических масштабах, когда вместе со смазочным материалом или воздухом уносятся обломки кристаллических образований. Продук­ты износа могут быть от размеров неразличимых пылинок до нескольких миллиметров; чистые поверхности в процессе образования окисляются, сами продукты износа в дальнейшем дробятся, слипаются, прилипают и впрессовываются в сопряженные поверхности. Продукты износа учас­твуют в процессе изнашивания в качестве промежуточной среды между поверхностями трения. Взаимное внедрение, глубинное вырывание, ад­гезия, заклинивание и впрессовывание продуктов износа предопределя­ют перенос материала с одной поверхности трения на другую.

Перенос материала с одной поверхности на другую свойствен всем видам трения, кроме трения при жидкостной смазке.

Перенос материала не характеризует износ поверхностей трения. Перенесенная частица может многократно переходить с одной по­верхности трения на другую и обратно. Износ будет в том случае, если перенесенная частица уйдет из зоны трения. Это связано с процессами прямого и обратного переносов и зависит от конечного механизма отры­ва перенесенной частицы, в частности, от ее окисления или же от возни­кновения неблагоприятных напряжений на границе раздела между час­тицей и подложкой. Перенос металла является одним из необходимых условий обеспечения ИП.

Можно было бы полагать, что износ увеличивает силу трения. Одна­ко это происходит не всегда. Если с повышением интенсивности изна­шивания наблюдается увеличение коэффициента трения, то это, как уже отмечалось, является следствием изменения в контактном взаимо­действии поверхностей в результате износа. Так, увеличение шерохова­тости поверхностей в результате износа приводит к их взаимному внед­рению.

Аналогично можно сказать и о влиянии переноса материала на силу трения. Не всякий перенос может увеличить силу трения. Перенос стали на хром, стали на сталь, бронзы на сталь увеличивает силу трения; при ИП сила трения не увеличивается, при переносе олова, выделяющегося из антифрикционного материала, на сталь или полимерного материала на сталь коэффициент трения не возрастает.

ВИДЫ ИЗНАШИВАНИЯ

АБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

1. Общие сведения

Абразивным материалом именуют минерал естественного или ис­кусственного происхождения, зерна которого имеют достаточную твер­дость и обладают способностью резания (скобления, царапания). Абра­зивным изнашиванием называют разрушение поверхности детали в ре­зультате ее взаимодействия с твердыми частицами при наличии относи­тельной скорости. В роли таких частиц выступают:

а) неподвижно закрепленные твердые зерна, входящие в контакт по касательной либо под небольшим углом атаки к поверхности детали (на­пример, шаржирование посторонними твердыми частицами мягких ан­тифрикционных материалов);

б) незакрепленные частицы, входящие в контакт с поверхностью детали (например, насыпные грузы при их транспортировании соответ­ствующими устройствами, абразивные частицы в почве при работе поч­вообрабатывающих машин и т.д.);

в) свободные частицы, пребывающие в зазоре сопряженных деталей;

г) свободные абразивные частицы, вовлекаемые в поток жидкостью или газом.

Абразивному изнашиванию подвергаются детали сельскохозяй­ственных, дорожно-строительных, горных, транспортных машин и тран­спортирующих устройств, узлы металлургического оборудования, метал­лорежущих станков, шасси самолетов, рабочие колеса и направляющие аппараты гидравлических турбин, лопатки газовых турбин, трубы водя­ных экономайзеров и паровых котлов, лопасти дымососов, трубы и насо­сы земснарядов, бурильное оборудование нефтяной и газовой промыш­ленности, подшипники валов гребных колес, подшипники гребных ва­лов судов при плавании на мелководье и т.п.

На процесс абразивного изнашивания может влиять природа абра­зивных частиц, агрессивность среды, свойства изнашиваемых поверхнос­тей, ударное взаимодействие, нагрев и другие факторы. Общим для абра­зивного изнашивания является механический характер разрушения по­верхности.

Абразивное изнашивание вызывает почва, грунт, руда, уголь и поро­да, зола, пыль, попавшие на поверхность трения, металлическая струж­ка, окисные пленки, закрепленные на поверхности трения или разрушен­ные, нагар и продукты износа, в особенности выкрошившиеся частицы твердых структурных составляющих.

Абразивные частицы могут иметь различную форму и быть самым различным образом ориентированы относительно сопряженной повер­хности. Способность абразивного зерна вдавливаться в поверхность за­висит не только от соотношения их твердостей, но и от геометрической формы зерна. Так, зерно выпуклой поверхностью или острым ребром может быть вдавлено, даже без пов­реждений, в плоскую поверхность бо­лее твердого тела. Это объясняет факт износа металла абразивными ча­стицами с твердостью, меньшей его твердости.

Иногда твердость окисных плёнок больше твердости самих металлов.

Наибольшую твердость (9) имеет окисел алюминия А12О3, твердость са­мого алюминия невелика (~2). Вслед­ствие этого при трении алюминия по стали окисные пленки, а также про­дукты разрушения этих пленок могут вызвать сильный износ даже самых твердых сталей. Мягкий окисел поч­ти не оказывает абразивного действия на другую поверхность. Магний обра­зует очень мягкий окисел Mg(OH)2, по­этому износ магнием более твердых металлов невелик даже при благоп­риятных условиях образования окисла. Это обстоятельство частично объ­ясняет, почему поршни из магниевых сплавов меньше царапают и зади­рают стенки цилиндров, чем поршни из алюминиевых сплавов. Чисто абразивное изнашивание окислами алюминия встречается в трущихся парах сталь, покрытая хромом, — алюминиевый сплав, применяемых в некоторых узлах самолетных конструкций из-за неизменного стремле­ния к снижению массы.

Окислы железа участвуют в абразивном изнашивании узлов метал­лургического оборудования, работающих при высокой температуре и не­достаточном смазывании.

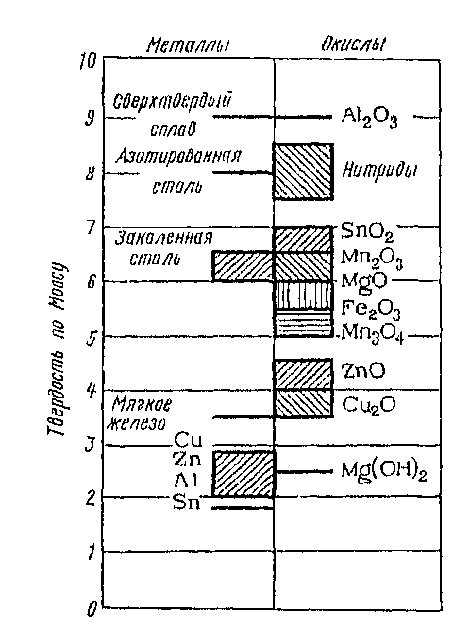


Рис. 7.1. Твердость металлов и окислов по шкале Мооса

ИЗНАШИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ТВЕРДЫМИ ЗЕРНАМИ

Допустим, что абразивные частицы входят в контакт с поверхностью металлической детали по касательной. Механизм изнашивания в этом случае представляется таким. Абразивные частицы (зерна) упруго дефор­мируют металл, оставаясь целыми или разрушаясь; в зависимости от структуры абразивного материала и среды зерна могут вдавиться в эту среду, повернуться или даже выйти из зоны контакта, как, например, час­тицы кварца в почве под давлением ножа грейдера. Абразивная частица вдавливается в металл детали, если она обладает большей твердостью, чем металлическое зерно, и прочностью, достаточной для воспринятая нагрузки, необходимой для вдавливания в металл, и если ее достаточно поддерживает основа. Внедрившаяся частица при движении относитель­но поверхности может процарапать риску или срезать микроскопичес­кую стружку. Резание может начаться только при определенном отноше­нии глубины проникновения абразива к радиусу скругления внедрившейся кромки. Так, для стали Ст.З это отношение должно быть больше 0,16 при сферической кромке. Если бы микрорезание было ведущим процес­сом разрушения поверхности при абразивном изнашивании или даже сопутствующим, то интенсивность изнашивания была бы настолько вы­сокой, что рабочие органы (например, строительных и дорожных машин) выходили бы из строя после весьма малого времени работы, исчисляемо­го несколькими часами.

Частота внедрения абразивных частиц мала, а основное количество внедряющихся частиц производит царапающее действие с оттеснением материала в стороны. По пути царапания свободная частица может по­вернуться и прекратить выдавливание материала; она может дойти до твер­дой структурной составляющей сплава, "перешагнуть" через нее и вновь начать царапание. Ее выступ может вырвать твердую составляющую, об­ломиться, частица может раздробиться. Если зерно закреплено, напри­мер зерно кварца в камне, и повернуться не может, то в этом случае ка­навки будут наиболее глубокими (0,001 ...0,02 мм) при небольшой длине (0,05...0,5 мм).

Дно канавки наклёпывается. Когда вся рабочая поверхность наклепается, сопротивление внедрению повысится. Если внедрение полностью не исключается, то после многократной пластической деформации на­ступит охрупчивание материала.

Установлено, что относительная износостойкость чистых металлов находится в линейной зависимости от микротвердости. Износостойкость сплавов оказалась меньше, чем чистых металлов той же твердости. Для сталей в термически необра­ботанном состоянии зависимость износостойкости от твердости такая же, как и для чистых металлов, Износостойкость сталей после их закалки и отпуска возрастает с увеличением твердости по линейному закону, но менее интенсивно, чем у чистых металлов и термически необработан­ных сталей. Испытания показали, что предварительный наклеп не повы­шает износостойкость чистых металлов и сталей.

*Выводы по влиянию твердости абразива на износ металлов таковы: если твердость абразивных зерен значительно превышает твердость ме­талла, то износ не зависит от разности твердостей абразива и металла; если твердость абразивных зерен ниже, чем твердость металла, то износ зависит от разницы твердостей и быстро уменьшается с увеличением этой разницы.*

При твердости металлической по­верхности, превышающей 60% твердости абразива, износостойкость резко возрастает. Такое отношение твердостей можно назвать критическим.

При большой относительной скорости рабочей поверхности и абразива дли­тельность взаимодействия с абразивной частицей мала, и выделившаяся теплота вследствие пластического деформирования не успевает распрос­траниться в глубь материала. Местный высокий нагрев изменит механи­ческие свойства материала, что повлечет изменение интенсивности из­нашивания.

Не исключаются также структурные превращения. Удары абразив­ных частиц о выступающие зерна металлической поверхности расшаты­вают их связи с основой и способствуют разрушению.

Некоторые элементы конструкции работают при повышенной тем­пературе, при которой возможно понижение механических свойств мате­риала. В таких случаях можно ожидать усиления абразивного действия частиц.

Агрессивная среда, вызывая электрохимические процессы на повер­хности детали, интенсифицирует изнашивание, превращая его в коррозионно-механическое.

**Абразивное изнашивание при ударе**

Процесс разрушения детали при ударном взаимодействии между деталью и абразивом называют ударно-абразивным изнашиванием. Это­му разрушению подвергаются детали буровых долот, камне-и рудомелющих агрегатов, породоразрушающий инструмент пневмо- и гидроудар­ников, детали гусеничного хода машин и др. Ударно-абразивное изнаши­вание поверхности происходит о монолитный или свободный абразив.

На ударно-абразивное изнашивание влияет природа и геометрическая форма, твердость, хрупкость абразивных частиц, толщина слоя абразива, энергия удара, твердость испытуемого материала и подложки, наличие жидкости в зоне удара и др.

При абразивном изнашивании без ударного взаимодействия повер­хности трения покрываются царапинами, расположенными в направле­нии движения абразива. Для ударно-абразивного изнашивания характер­но образование на поверхности трения лунок в результате локальной плас­тической деформации металла. Края лунок образуют те выступы, кото­рые внедряются в сопряженную поверхность и имеют твердость, превы­шающую твердость металла, или имеют наиболее благоприятное распо­ложение своих граней к поверхности детали. Края лунок с меньшей твер­достью обычно разрушаются, не повреждая поверхность детали. При многократном взаимодействии абразива с поверхностью детали лунки расширяются и углубляются. В результате поверхность наклёпывается, и происходит отрыв от нее частиц. Обычно это происходит у пластичных материалов. Для изнашивания твердых материалов характерно хрупкое выкрашивание.

При ударно-абразивном изнашивании износостойкость углеродистых сталей зависит не только от твердости, но и от состава и структуры стали. Максимальной износостойкостью обладают сталь, содержащая 0,7% уг­лерода. Стали с большим содержанием углерода в результате хрупкого выкрашивания имеют меньшую износостойкость. При содержании угле­рода менее 0,7% стали подвергаются пластической деформации и боль­ше изнашиваются. Чем сильнее ударное взаимодействие, тем больше ска­зывается содержание углерода на износостойкость стали.

**Изнашивание от абразивных частиц в потоке жидкости или газа**

При допущении, что среда неагрессивна к поверхности детали, сле­дует различать два случая взаимодействия абразива с материалом.

* + 1. Удар прямой, угол атаки а = 90°. В зависимости от массы частиц, скорости их падения, свойств абразива и физико-механических свойств материала детали возникает упругая деформация, пластическая дефор­мация, хрупкое разрушение, перенаклеп с отделением материала в виде чешуек. По данным К. Велингера и Г. Веца, наибольшей износостойкостью при твердости абразивных частиц, равной и выше твердости кварца, и скорости потока около 100 м/с обладает резина и спеченные материалы; весьма малой износостойкостью — базальт и стекло. Износостойкость углеродистых и инструментальных сталей примерно одного и того же порядка.
    2. Косой удар, 0 < а < 90°. При углах атаки не выше угла трения на характер повреждения поверхности сильно влияет касательная составля­ющая импульса и сопротивление материала воздействию касательных сил на поверхность. У резины, по данным В. Н. Кащеева, скорость изнашива­ния уменьшается при увеличении угла атаки до угла трения, а затем ста­новится постоянной; у других материалов, в зависимости от соотноше­ния твердостей абразива и изнашиваемой поверхности, скорость изна­шивания может непрерывно возрастать или достигать максимума при некотором угле атаки, а затем убывать.

В одних случаях износостойкость резины в несколько раз выше, чем закаленной стали, в других случаях (при нулевом угле атаки) износостой­кость резины ниже, чем стали, в связи с фрикционной природой усталос­тного повреждения поверхности.

Влияние влажности и агрессивности среды на абразивное изнашивание

Влажность увеличивает интенсивность абразивного изнашивания, так же как и агрессивность среды.

Уже при содержании в абразиве влаги (водопроводная вода) 1% интенсивность изнашивания возрастает в 1,2...2,7 раза в зависимости от угла атаки.

Скачкообразное увеличение интенсивности изнашивания при малых добавках воды наблюдается и у коррозионно-стойких сталей.

Исследования показывают, что вода действует как окислитель и мо­жет приводить к коррозии. Она может оказать разрушающее действие и привести к опасным повреждениям механически напряженных деталей машин.

**Окислительное изнашивание**

Окислительное изнашивание происходит в том случае, когда на со­прикасающихся поверхностях образуются пленки окислов, которые в процессе трения разрушаются и вновь образуются; продукты износа со­стоят из окислов. От других видов коррозионно-механического изнаши­вания оно отличается отсутствием агрессивной среды, протекает при нор­мальных и повышенных температурах при трении без смазочного мате­риала или при недостаточном его количестве. Интенсивность изнашива­ния может быть весьма значительной, но поверхности трения сохраняют малую шероховатость; это объясняется тем, что окислы препятствуют схватыванию поверхностей. При обычных температурах окисление по­верхностей активизируется пластической деформацией. Поэтому одним из методов борьбы с окислительным из­нашиванием является создание поверх­ностей трения с высокой твердостью.

Для окислительного изнашивания необходимо, чтобы промежуток времени между последовательными разрушения­ми пленки был достаточен для образова­ния пленки относительно большой тол­щины. Естественно, что в случае цикли­ческого разрушения окислов высокой твердости изнашивание будет носить ха­рактер абразивного.

Окислительному изнашиванию под­вергаются калибры, детали шарнирно- болтовых соединений тяг и рычагов ме­ханизмов управления; шарнирно-болтовые соединения подвесных устройств машин, работающих без смазочного ма­териала; металлические колеса фрик­ционных передач и чашки вариаторов, а также некоторые детали в парах трения качения.

Повышение температуры способст­вует росту окисных пленок, а вибрация — их разрушению.

В ряде случаев интенсивность окислительного изнашивания можно уменьшить, сменив смазочный материал, понизив температуру узла. Ка­залось бы, что применение коррозионно-стойкой стали должно дать до­полнительный эффект, однако аустенитные стали, не говоря о склоннос­ти их к схватыванию, быстро окисляются в процессе трения.

**Изнашивание вследствие пластической деформации**

Этот вид изнашивания (смятие) заключается в изменении размеров или формы детали в результате пластической деформации ее микрообъ­емов. Пластическое деформирование обычно сопровождает износ метал­лов и наблюдается в зоне, непосредственно прилегающей к поверхности трения. Здесь же имеется в виду деформация, распространяющаяся на всю деталь или на значительные объемы ее. Смятие может произойти при трении, но может быть и не связано непосредственно со скольжени­ем или качением поверхностей.

Смятие является характерным видом повреждения шпоночных па­зов и шпонок, шлицевых соединений, штифтов и упоров, резьбовых со­единений и других деталей. Плас­тическая деформация вызывается либо чрезмерными допускаемыми напряжениями, либо случайными значительными перегрузками.

Смятие характерно для дета­лей, входящих в контакт с ударом. К ним относятся, например, регули­ровочные болты коромысел при­водов клапанов и седла шаровых клапанов.

**Изнашивание вследствие диспергирования**

Многие детали трения не имеют на рабочих поверхностях следов схватывания и заметных царапин; они работают при достаточно хоро­шем смазывании и умеренных температурах. В тонких поверхностных слоях таких деталей не происходит каких-либо химических и структур­ных изменений. При этих условиях разрушение поверхностного слоя происходит в результате диспергирования (измельчения) отдельных учас­тков контакта. Интенсивность этого вида изнашивания невысока, а ше­роховатость поверхности деталей малая.

Процесс изнашивания протекает так: на площадках фактического контакта материал подвергается многократной упругой и пластической деформации, что приводит к разупрочнению, разрыхлению в отдельных местах структуры материала с последующим отделением небольших бло­ков. Процесс разрыхления, вероятно, подобен процессу зарождения и развития усталостной трещины в детали под действием циклических на­грузок. Поверхностная пластическая деформация приводит также к охрупчиванию материала на отдельных микроучастках и его выкалыванию. Не исключаются повреждения, связанные с взаимным внедрением микроучастков поверхностей без разрушения масляной пленки.

Изнашиванию вследствие диспергирования подвергаются хорошо смазываемые шарнирно-болтовые соединения, валики различных агре­гатов и сопряженные с ними подшипники, поршневые пальцы прицеп­ных шатунов, пары трения топливной аппаратуры и др.

Диспергирование рабочих поверхностей может происходить также в случае жидкостной смазки при большой надежности. Так, поверхность шипа при вращении, переходя из ненагруженной зоны в нагруженную, испытывает переменное давление, влияющее на циклы изгибных напряжений. При высокой частоте вращения и относительно большой длитель­ности работы, когда суммарное число циклов исчисляется десятками мил­лионов, легко допустить накопление субмикроскопических дефектов даже при весьма низких напряжениях, что в совокупности с адсорбционно- расклинивающим эффектом приводит к износу поверхности при малой интенсивности изнашивания.

**Изнашивание в результате выкрашивания вновь образуемых структур**

При тяжелых условиях работы на поверхностях трения происходят физико-химические изменения. Они являются результатом пластического деформирования, повышения температуры слоев металла, прилегающих к зоне контакта, последующего быстрого охлаждения и химического дей­ствия окружающей среды. Эти физико-химические изменения, заключа­ющиеся в образовании новых структур, в свою очередь изменяют вид взаимодействия и характер разрушения поверхностей.

На поверхностях трения стальных и чугунных деталей иногда обра­зуются блестящие белые пятна или полосы, полностью или почти не тра­вящиеся обычными металлографическими реактивами. Эти образования, открытые В.П. Кравз-Тарнавским в 1928 г., получили наименование бе­лого слоя. Твердость белых слоев того же порядка, что и материала дета­ли, но бывает значительно выше твердости мартенсита средиеуглеродистой стали. Слой отличается высокой хрупкостью, структура слоя высоко­дисперсная. В зависимости от условий образования белые слои могут состоять из мартенсита, смеси аустенита и мартенсита, цементита и фер­рита и из других сочетаний структур. Может случиться, что на одной де­тали будут разные по структуре белые слои. Образование белого слоя обязано быстро протекающему термическому либо химико-термическому процессу.

Процесс возникновения и развития белого слоя на поверхностях тре­ния представляется следующим. На отдельных участках фактического контакта происходит интенсивная пластическая деформация, сопровож­дающаяся значительным тепловыделением. Теплота, концентрируясь в поверхностных микрообъемах, создает большой температурный гради­ент по глубине, в результате скорости нагрева и охлаждения микрообъ­емов больше, чем при термической обработке. Повышение температуры в отдельные моменты выше критической точки приводит к образованию аустенита из феррито-цементитной смеси, а последующее резкое охлаж­дение — к появлению закалочных структур, которые в дальнейшем, под­вергаясь пластической деформации и периодическому воздействию тем­пературного фактора, переходят в белый слой. Аналогично описанному образуется белый слой при "пропахивании" поверхности трения абра­зивом.

В образовании белого слоя может активно участвовать воздух, сма­зочный материал, сопряженная деталь. Встречаются белые слои, содер­жащие азот и кислород, а также насыщенный углеродом аустенит и слож­ного состава карбиды. Очаги с повышенным содержанием углерода на поверхности образуются в результате диффузии его из более глубоких слоев материала или разложения смазочного масла.

Пластическая деформация стимулирует диффузионную активность металла, как в силу образования микро- и субмикродефектов (микротре­щин, микропор и вакансий), так и в силу относительно значительных пе­ремещений металла и обнажения ювенильных поверхностей.

Одновременно с образованием белого слоя возникает система внут­ренних напряжений, которая совместно с рабочими напряжениями при­водит к растрескиванию слоя и выкрашиванию его отдельных частиц. Продукты износа, попадая в зазоры между сопряженными деталями, мо­гут вызывать интенсивное, доходящее до катастрофического, изнаши­вание.

Белые слои образуются на рабочих поверхностях рельсов и бандажей колес локомотивов и вагонов, на зубьях шестерен, подшипниках каче­ния, поршневых кольцах двигателей внутреннего сгорания, на лопат­ках быстроходных керосиновых насосов и их корпусах и других деталях. Белые слои могут появиться в процессе заедания чугун­ных деталей или деталей, изготовленных из высокоуглеродистых сталей, а также при ударах. Белый слой обнаруживается при обработке сталей при скоростях резания 12...27 м/мин и несколько выше, при шлифовоч­ных ожогах, наклепе, а также под воздействием горячих газовых струй. Иногда белый слой пятнами располагается на дне и стенках образовав­шихся рисок на поверхности трения и может быть выявлен после травле­ния поверхности кислотами. Белые слои искусственно создают при электроупрочнении для повышения износостойкости деталей и упрочне­ния инструмента. Чем больше углерода содержится в стали, тем при прочих равных условиях больше образуется белого слоя. Недостаточная приработка по­верхности трения или форсированный ее режим могут служить причиной образования белого слоя. Природа белого слоя и роль различных легиру­ющих элементов и образуемых структур, например фосфидных эвтектик в чугуне, еще недостаточно изучены.

Белый слой является ярким проявлением образования новых струк­тур. Помимо него в процессе трения в связи с температурным фактором возможны коагуляция структурных составляющих, закалка и отпуск, что может привести к образованию ультрамикроскопических трещин.

**Коррозия**

Коррозией называют разрушение поверхности металла в результате химического или электрохимического воздействия среды. Чистая метал­лическая поверхность легко подвергается химическому воздействию среды.

Однако, если в процессе начавшейся коррозии продукты ее образуют прочно связанную с металлом пленку, изолирующую поверхность от кор­розионной среды, то металл приобретает пассивность по отношению к ней. Процесс искусственного образования тонких окисных пленок на поверхности металла для защиты его от коррозии и придания изделию лучшего вида называют пассивированием. Способностью к пассивиро­ванию обладают железо, никель, хром, алюминий и другие металлы.

Химическая коррозия протекает при взаимодействии металлов с су­хими газами и парами и жидкими неэлектролитами. Остановимся на га­зовой коррозии. Этому виду коррозии подвержены в большей или мень­шей степени цилиндры двигателей внутреннего сгорания, выпускные клапаны, камеры сгорания газовых турбин, элементы паровых котлов и пароперегревателей, арматура печей и т. п. Среди процессов газовой кор­розии наиболее часто встречается окисление металла при высоких тем­пературах за счет кислорода воздуха или С02 и 02 в продуктах сгорания топлива.

На поверхности углеродистой стали газовая коррозия проявляется в виде пленок окислов уже при температуре 200...300°С. С повышением температуры примерно до 600°С в связи с образованием под действием внутренних напряжений трещин в защитной пленке скорость коррозии возрастает, оставаясь все же довольно низкой. При дальнейшем подъеме температуры скорость коррозии резко увеличивается, и образуется ока­лина.

Опыты с образованием окислов на чугунах в различных газовых сре­дах, выполненные Э.О. Травицкой, показали, что скорость коррозии при возрастании температуры от 500 до 800°С увеличивается в сухих газах в 11...13 раз и во влажных в 20 раз. Скорость окисления в среде С02 не только выше, чем в воздухе (сухом и влажном), но и выше, чем в 02.

На алюминии и его сплавах защитная пленка быстро достигает на­ибольшей толщины при температуре 300...600°С, прекращая процесс га­зовой коррозии. У железоуглеродистых сплавов при газовой коррозии наблюдается обезуглероживание поверхностных слоев металла, что сни­жает его механические характеристики, при этом существенно уменьша­ется сопротивление усталости й поверхностная твердость.

Поскольку объем окислов больше, чем объем металла, из которого они образовались, то проникновение окисляющих газов в микротрещины и по границам графитовых включений приводит к "росту чугуна" — уве­личению его объема, что иногда наблюдается при газовой коррозии не подвергнутого старению чугуна.

Электрохимическая коррозия протекает при действии на металлы жидких электролитов, например, разрушение гребного вала в морской воде при отсутствии протекторной защиты.

Электрохимическая коррозия обусловлена неоднородностью металла в контакте с электролитом. Эта неоднородность проявляется в различ­ных формах. Неоднородность сплавов связана с тем, что они состоят из двух и более структурных составляющих. Неоднородное физическое со­стояние металла обусловлено различием между зерном и его границей, неоднородностью структуры (ликвация, газовые пузыри и неметалличес­кие включения). Различное напряженное состояние смежных участков детали под нагрузкой изменяет физическое состояние даже однородного металла. Различие в концентрации раствора электролита, смачивающего металл, и неодинаковые условия подвода кислорода к различным участ­кам поверхности — это иная категория неоднородности состояния; к ней можно отнести и неодинаковую температуру участков поверхности. Су­ществование на поверхности металла микроучастков с различными элек­трическими потенциалами является причиной образования огромного ко­личества гальванических микроэлементов, в результате работы которых происходит коррозия.

На скорость коррозии влияет температура (с повышением ее корро­зия усиливается) и скорость смывания средой металлической поверхнос­ти; при значительной скорости среды коррозия усиливается под действи­ем эрозии.

В некоторых машинах можно встретиться с щелевой коррозией, при которой коррозионные повреждения сосредоточены в зазоре между по­верхностями. Зазором могут быть щели между листами, зазоры в сопря­жениях и стыках, зоны трещин в металле, а также щели между осевшими или прилипшими к поверхности посторонними веществами. В среде элек­тролита щелевая коррозия обязана различной концентрации металличес­ких ионов внутри и вне щели, а в среде воздуха она связана с неравно­мерной аэрацией. Малодоступные для кислорода или электролита участ­ки поверхности металла в зазоре или щели становятся анодом по отно­шению к остальной поверхности, к которым кислород или электролит имеет свободный доступ и которые становятся катодом.

Щелевой коррозии подвержены даже металлы, которые устойчивы к другим видам коррозии благодаря образованию на их поверхностях пле­нок, обладающих высокими защитными свойствами. Вибрации и эпизо­дические относительные микросмещения поверхностей повреждают об­разующуюся защитную пленку в щели, благоприятствуют ее удалению, и, создавая условия для большей неравномерности концентрации среды, способствуют более интенсивной коррозии в щели.

Пыль, даже химически неактивная, оседая на незащищенную метал­лическую поверхность или находясь под слоем смазочного материала, вызывает коррозию. Это объясняется тем, что к местам, покрытым пылью, затруднен доступ воздуха и ухудшается взаимодействие смазочного ма­териала с металлом. Пыль поверх смазочного материала подобного эф­фекта не производит.

Газовая коррозия, как и электрохимическая, не является видом изна­шивания. Коррозия может проявляться при кавитационном разрушении и фреттинг-коррозии, во многих случаях протекает параллельно с эро­зией, всегда облегчает ее и сопровождает процесс трения, в особенности трения без смазочного материала, существенно влияя на износ рабочих поверхностей деталей.

*Атмосферная коррозия и наводороживание.* При атмосферной кор­розии происходит интенсивное наводороживание стальных деталей. У стали, насыщенной водородом, резко снижается сопротивление механи­ческим нагрузкам и износостойкость.

Интенсивность наводороживания при атмосферной коррозии зави­сит от влажности и загрязненности воздуха промышленными газами, на­пример H2S.

При работе подвижных деталей многих видов техники коррозион­ные процессы занимают большое место, особенно в процессе окисли­тельного изнашивания и изнашивания при фреттинг-коррозии. При та­ких видах изнашивания неизбежно произойдет наводороживание повер­хности, образование микротрещин, резкое снижение сопротивления ус­талости и уменьшение сроков службы узлов трения.

**Кавитационное изнашивание**

Гидродинамическая кавитация

Кавитация дословно означает полость, каверна. Однако под кавита­цией понимают явление образования в движущемся по поверхности твер­дого тела потоке жидкости пустот в виде пузырей, полос и мешков, на­полненных парами, воздухом или газами, растворенными в жидкости и выделившимися из нее. Это явление обусловлено следующим. В движу­щемся с большой скоростью потоке при его сужении и наличии препят­ствий на его пути давление может упасть до давления, соответствующего давлению парообразования при данной температуре. При этом, в зави­симости от сопротивления жидкости растягивающим усилиям, может произойти разрыв, нарушение сплошности потока. Образующаяся пу­стота заполняется паром и газами, выделившимися из жидкости. Воз­дух, вовлекаемый в поток, облегчает возникновение кавитации. Образо­вавшиеся парогазовые пузыри размерами порядка десятых долей мил­лиметра, перемещаясь вместе с потоком, попадают в зоны высоких давлений. Пар конденсируется, газы растворяются, и в образовавшиеся пустоты с громадным ускорением устремляются частицы жидкости; происходит сопровождаемое ударом восстановление сплошности потока.

Кавитация наблюдается в трубопроводах, в гидромониторах и в по­токах, обтекающих лопатки центробежных и пропеллерных насосов и лопастей гидравлических турбин и гребных винтов. Явление кавитации вызывает вибрации, стуки и сотрясения, что приводит к расшатыванию крепежных связей, обрыву болтов, смятию резьб, фрикционной корро­зии стыков, нарушению уплотнений и усталостньм поломкам.

Кавитация понижает КПД машин и гребных винтов и вызывает не­посредственное разрушение поверхностей деталей в зоне ее действия. Она способствует закоксовыванию распылителей форсунок двигателей внут­реннего сгорания.

Труднообтекаемая форма и неровности поверхностей, включая не­ровности, образовавшиеся по причине кавитационного изнашивания, служат причиной образования вихрей и отставания струй от стенок рабо­чих каналов, что способствует возникновению или усилению кавитации.

Предпосылки для наступления и протекания кавитационного изна­шивания следующие. При замыкании до полного исчезновения парога­зовых пузырей у поверхности детали последняя подвергается микроско­пическим гидравлическим ударам (рис. 9.2).

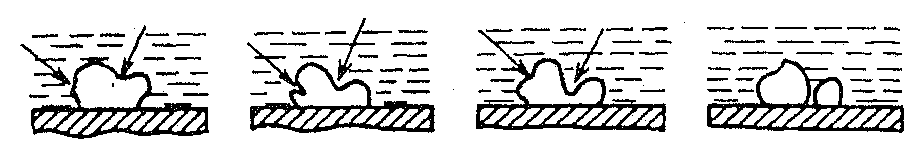


Схема гидравлических ударов при сокращении навигационного пузыря

Из нескольких миллионов образуемых кавитационных пузырьков примерно один из 30 тыс. прини­мает участие в разрушении. Под воздействием ударов поверхность ме­талла начинает деформироваться и наклёпываться на малую глубину; появляются линии сдвига, и происходит как бы своеобразное травление с выявлением границ отдельных зерен. Многократно повторяющиеся удары вызывают разупрочнение, перенаклеп материала на отдельных микроучастках, сопровождающиеся возникновением очагов разрушения в виде трещин. Разрушается прежде всего менее прочная структурная составляющая (в сталях феррит, в чугунах — графитовые включения). За разрушением малопрочной составляющей может последовать выкраши­вание и более прочных составляющих. Разрушение развивается в пред­елах зерен или по их границам в зависимости от соотношения прочности зерна и связи между зернами.

Коррозионные явления играют существенную роль в процессе кави­тационного изнашивания. Например, в морской воде интенсивность из­нашивания намного выше, чем в пресной при прочих равных условиях. Однако механическим воздействиям принадлежит основная роль, свиде­тельством чему может служить низкая кавитационная стойкость лакок­расочных, цинковых и алюминиевых покрытий, имеющих малую меха­ническую прочность, эбонита и плексигласа, являющихся коррозионно- стойкими неметаллическими материалами. Скорость кавитационного изнашивания может быть в сотни и более раз выше скорости коррозион­ного разрушения поверхностного слоя.

Предупредить кавитацию можно, проектируя гидромеханическую систему так, чтобы во всех точках потока давление не опускалось ниже давления парообразования. Однако возможность кавитации всегда сле­дует учитывать.

Интенсивность кавитационного изнашивания зависит от темпе­ратуры, свойств жидкости и природы материала деталей. Влияние вяз­кости незначительно. С увеличением поверхностного натяжения изнаши­вание происходит более интенсивно. Введение в воду веществ, образую­щих и способствующих образованию эмульсий (масла и эмульгаторы), понижает поверхностное натяжение и снижает кавитационное изнаши­вание. Воде с температурой 50°С соответствует наибольшая интенсив­ность изнашивания. По обе стороны от этой температуры наблюдается довольно резкое падение интенсивности изнашивания.

**Вибрационная кавитация**

При колебании твердого тела относительно жидкости или жидкости относительно твердого тела давление в жидкости на границе раздела жидкости и твердого тела может упасть и вызвать образование кавитационных пузырей. Условия кавитации зависят от внешнего давления на сис­тему и насыщенности жидкости воздухом.

Вибрационную кавитацию могут вызвать звуковые колебания, осо­бенно ультразвуковые. Звуковые волны ускоряют окислительно-восстановительные реакции, вызывают внутримолекулярные перегруппировки веществ, усиливают диспергирование, ускоряют процессы мойки и обез­жиривания поверхностей и вызывают коагуляцию мелких частиц. При вибрации не исключается кавитация в тонком смазочном слое между по­верхностями, которая может привести к выкрашиванию материала под­шипников скольжения, зубьев колес и поверхностей других деталей.

Вибрационная кавитация проявляется в двигателях внутреннего сго­рания, особенно на наружных поверхностях гильз в результате их коле­баний от ударов поршня. Износ от кавитации наружной стенки гильзы может быть в 3—4 раза больше, чем износ внутренней поверхности от действия поршневых колец.

**Эрозионное изнашивание**

Эрозия в широком понятии — процесс поверхностного разрушения вещества под воздействием внешней среды. В машиностроении эрозия имеет более узкое понятие — разрушение поверхности материалов вслед­ствие механического воздействия высокоскоростного потока жидкости, газа или пара. Разрушение металлов под действием электрических заря­дов также относится к эрозии. JI.A. Урванцев подразделяет эрозию на газовую, кавитационную, абразивную и электрическую. Каждый вид эро­зии имеет подвиды, которые являются сочетанием отдельных видов, на­пример, газовая эрозия может быть газоабразивной, газоэлектрической и т.д. [5].

Эрозионное воздействие высокоскоростного потока жидкости, газа или пара в чистом виде слагается из трения сплошного потока и его уда­ров о поверхность. В результате трения происходит расшатывание и вы­мывание отдельных объемов материала. Вообще говоря, скорость изна­шивания в этом случае мала. Несравненно большая роль принадлежит динамическому действию потока или струи. В зависимости от свойств материала возможны вырывы отдельных объемов или групп зерен с не­благоприятной ориентацией в отношении приложенных сил. В пластич­ных материалах, обладающих способностью наклёпываться, вначале на­капливаются микропластические деформации отдельных участков, а когда способность к упрочнению исчерпается, эти участки разрушаются, вы­мываются. Жидкость, внедряющаяся при ударах в образовавшиеся мик­ротрещины, ведет себя подобно клину, раздвигая боковые стенки.

Эрозия в начальный период на гладкой поверхности развивается весь­ма медленно, но после появления пораженных мест усиливается. Это можно объяснить повышением хрупкости поврежденного поверхностного слоя в связи с накоплением микротрещин, расклинивающим действием жидкости и усилением ударного действия из-за большого вихреобразования у поверхности.

Эрозионное изнашивание во многих случаях было бы слабее, если бы не было присутствия посторонних частиц в потоке. Если поток содержит абразивные частицы, то изнашивание ста­новится эрозионно-абразивным.

Эрозия и коррозия весьма часто протекают совместно. Коррозионно-эрозионное изнашивание представляет собой разновидность коррозионно-механического изнашивания. Роль обоих факторов зависит от соотношения механического и химического воздействия на материал.

Агрессивность среды вносит особенности в процесс эрозионного изнашивания, поэтому не все закономерности абразивного процесса спра­ведливы для эрозионно-абразивного изнашивания. В этом случае мате­риалы должны обладать коррозионной стойкостью и сопротивлением абразивному воздействию. Степень этих качеств должна варьироваться в зависимости от влияния каждого фактора. Это же следует учитывать и при коррозионно-эрозионном изнашивании.

**Изнашивание при схватывании**

Процесс возникновения и разрушения узлов схватывания видоизме­няется в зависимости от конструкции деталей, их материалов и режимов трения. Рассмотрим проявления схватывания и адгезии, наблюдаемые при испытании образцов на машинах трения, и при исследовании техничес­кого состояния узлов трения.

1. Вырывы материала в виде микроскопических и субмикроско­пических частиц с одной поверхности и перенос их на другую поверхность. При работе приваренные частицы срабатываются, вырываются и уносятся от зоны трения. Повреждения поверхностей наблюдаются под микроскопом, а мельчайшие частицы могут быть обнаружены лишь авторадиографией. Независимо от частоты образования узлов схватывания интенсивность изнашивания будет мала. Такое проявление схватывания не может вы­звать катастрофического разрушения.

2. Образование тонкой пленки (налета) мягкого материала на твер­дой сопряженной поверхности, например, омеднение режущих кромок резца при резании меди и ее сплавов, намазывание бронзы на сталь (на валы, червяки, болты), свинца на сталь, стали или алюминиевого сплава на хромовое покрытие; полимера, резины на вал. Последствия такого схва­тывания следующие:

может наблюдаться интенсивное изнашивание, например, в случае, когда бронзовая пленка отделяется от стальной детали, уносится из зоны трения и возникает вновь;

при высокой скорости скольжения из-за большого тепловыделения, вызванного значительной силой трения между одноименными металла­ми, намазывание бронзы может закончиться заеданием;

намазывание вызывает скачок силы трения, не влияя заметно на из­нос (например, намазывание полиамидов на стальной вал);

намазывание является стадией предкатастрофического повреждения поверхностей трения; тончайший слой стали, намазанный на хромиро­ванную поверхность, схватывается со стальной поверхностью трения, и образуются вырывы хромового покрытия и изнашивание его наклепан­ными частицами хрома; затем происходит обратный перенос хрома на покрытие с образованием новых больших очагов схватывания; таким образом, возникает сложная цепь взаимоперекрывающихся явлений;

намазывание резины на стальную или бронзовую шейку вала об­ращает как правило, пару трения во фрикционную пару с повреждением резиновой поверхности;

образование тонкого слоя меди на стальной поверхности при ИП не приводит к износу сопряжения и повышению сил трения.

1. Перенос твердого материала на мягкую поверхность. Сталь пере­носится на бронзу, бронза вследствие адгезии переносится на резину или пластик. На более твердой поверхности образуются риски в результате царапающего действия перенесенного металла, находящегося в накле­панном состоянии. Такой вид схватывания приводит к потере работоспо­собности узла трения, хотя проявляется редко, обычно при чрезмерно высоких давлениях и температурах. На рис. 6.8 показан поврежденный бронзовый золотник керосинового насоса и сопряженная с ним стальная поверхность ротора. При перекосе подшипника по отношению к ротору повысилось местное давление и произошло вырывание частиц стальной поверхности и перенос их на бронзовую поверхность. Такое перенесение частиц вызвало усиленное рискообразование на стальной поверхности ротора. Здесь разрушение поверхности обязано водородному из­нашиванию.
2. Вырывание материала с образованием глубоких борозд, уступов и впадин. Процесс вырывания сопровождается интенсивным наклепом поверхностных слоев на значительную глубину. При металло­графическом исследовании поврежденных участков видна вихреобраз- ная текстура, вытянутость зерен по направлению движения поверхностей.

При больших скоростях скольжения в процессе образования повреж­дений на поверхностях возникают "белые слои".

Глубинное вырывание поверхностных слоев является катастро­фическим явлением; оно приводит к повышению скорости изнашивания в десятки тысяч раз, увеличению сил трения, повреждению поверхностей, что снижает сопротивление усталости деталей, а в ряде случаев вызыва­ет их заклинивание и поломку.

Как было показано, схватывание материалов проявляется в самых разнообразных формах. Начинается оно с субмикроскопических повреж­дений, переходя постепенно к локализованному разрушению поверхностного слоя, различимому невооруженным глазом, и к глубинному вырыва­нию; затем разрушение может приобрести лавинный характер. При эк­сплуатации машин для качественной оценки степени повреждения по­верхностей используют следующие термины.

*Натир* — участок поверхности трения, отличающийся по цвету от прилегающих участков и испытывающий наибольшее давление. Натир бывает светлым (результат сглаживания микронеровностей поверхности или образования мельчайших рисок в направлении скольжения) и темно­го цвета (результат местных повышенных температур и образования окисных пленок). Натиры могут образовываться при любом виде изнашива­ния; вместе с тем они могут стать зонами повреждения от схватывания, если режим трения изменился в неблагоприятную сторону.

*Задир* — образование в результате схватывания различимой не­вооруженным глазом борозды с оттеснением материала как в стороны, так и по направлению скольжения. Может образоваться и группа борозд. Применительно к отдельным узлам были попытки дифференцировать задиры по степени повреждения поверхности. Классификация степени повреждения поверхностей зубьев предложена Я.Г. Кистьяном. Исследо­вания противозадирной стойкости металлов изучено в работе [7].

*Заедание* — наиболее яркая форма проявления схватывания. Обра­зуются широкие и глубокие борозды с неровными краями, иногда слив­шиеся; присутствуют крупные наросты; возможно оплавление поверхнос­ти. Может произойти полное заклинивание деталей.

профилю не меняет своего направления, и частица должна переместить­ся по всей высоте зуба, прежде чем выйдет из зоны трения. Это зацепле­ние, как показывает опыт эксплуатации, склонно к задирам, и приработ­ка его вызывает большие трудности. Окружная скорость тоже влияет на сопротивление поверхностей заеданию. С увеличением окружной ско­рости растет и скорость скольжения, смазочная пленка устанавливается большей толщины, но в слое смазочного материала увеличивается тепло­выделение, которое способствует уменьшению толщины пленки. Суммар­ное действие этих двух факторов при достаточном теплоотводе от повер­хности колеса приводит к тому, что с увеличением окружной скорости можно допустить большую, чем расчетную, температуру контакта без опасности заедания.

ИЗНАШИВАНИЕ ПРИ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ

1. Общие сведения

Фреттинг-коррозия — это процесс разрушения плотно контактирующих поверхностей пар металл—металл или металл—неметалл в ре­зультате малых колебательных относительных перемещений. Для возбуж­дения фреттинг-коррозии достаточны перемещения поверхностей с ам­плитудой 0,025 мкм. Разрушение заключается в образовании на соприка­сающихся поверхностях мелких язвин и продуктов коррозии в виде на­лета, пятен и порошка. Этому виду изнашивания подвержены не только углеродистые, но и коррозионно-стойкие стали в парах трения сталь— сталь (могут быть как одноименные, так и разноименные), сталь—олово или алюминий, сурьма, а также чугун—бакелит или хром и многие дру­гие пары трения.

Вследствие малой амплитуды перемещения соприкасающихся по­верхностей повреждения сосредоточиваются на небольших площадках действительного контакта. Продукты износа не могут выйти из зоны кон­такта, в результате возникает высокое давление и увеличивается их абра­зивное действие на основной металл.

При фреттинг-коррозии относительная скорость движения сопри­касающихся поверхностей небольшая. Из­нашивание при фреттинг-коррозии наблюдалось при средней относительной скорости поверхностей 0,02 мм/ч.

Если амплитуда колебательного движения большая (около 2,5 мм), то площадь поражения фреттинг-коррозией увеличивается, и картина изнашивания напоминает ту, которая происходит при однонаправленном скольжении. Поэтому можно считать, что амплитуда перемещения по­верхностей около 2,5 мм является верхним пределом амплитуды для воз­буждения фреттинг-коррозии. Все сказанное относится к несмазанным поверхностям.

Продукты фреттинг-коррозии стальных изделий в атмосфере воздуха имеют цвет от светло-красно-коричневого до темно-коричневого в зави­симости от марок материалов, давления, влажности и частоты циклов микросмещений. Состав этих продуктов: основная масса Fe2О3, неболь­шое количество а-железа, могут присутствовать окислы FeO, Fe3О4 и гид­роокись Fe2О3 • Н2О, иногда обнаруживаются нитриды. Окислы, нитриды и гидраты образуются при разрушении всех металлов, за исключением платины, продукты износа которой состоят из черного порошка чистой платины.

Фреттинг-коррозия осуществляется также в вакууме, в среде кисло­рода, азота и гелия. Интенсивность изнашивания при фреттинг-коррозии в атмосфере воздуха выше, чем в вакууме и в среде азота, а в кислороде больше, чем в гелии. Если бы интенсивность изнашивания определялась только силами трения, то она была бы выше в вакууме, чем на воздухе, поскольку в вакууме силы трения значительно больше. Существенную роль в процессе фреттинг-коррозии играет окисление поверхностей трения или металлических продуктов разрушения. Вместе с тем на кинетику реак­ции окисления влияет и механический фактор, о чем свидетельствует хотя бы появление при фреттинг-коррозии окислов кадмия, отличных от ра­нее известных окислов этого металла. Таким образом, фреттинг-коррозия представляет собой вид разрушения металлов и их сплавов в мало- и неагрессивных коррозионных средах под одновременным воздействием механических и химических факторов.

Язвины и продукты коррозии на сопряженных поверхностях валов и напрессованных на них дисков, колес, муфт и колец подшипников каче­ния, на осях и ступицах колес подвижного состава железных дорог, на запрессованных в картерах вкладышах подшипников, на пригнанных поверхностях шпонок и их пазов, на центрирующих поверхностях шлицевых соединений, на опорах силоизмерительных устройств, на опор­ных поверхностях пружин, на затянутых стыках, в заклепочных соедине­ниях между листами, на заклепках и в отверстиях, на болтах и т. п. — результат проявления фреттинг-коррозии. Фреттинг-коррозия наблюдается в проволочных кана­тах, электровыключателях, рубильниках и штепсельных разъемах. Продукты фреттинг-коррозии накапливаются в виде порошков, содержащих металлические частицы. Они образуются в результате тре­ния алюминиевого контейнера при его перевозке о металлические части судна и являются взрывоопасными. В случае выпадения порошков изно­са из зоны трения происходит ослабление посадок с натягом.

Необходимые для протекания этого процесса относительные мик­росмещения сопряженных поверхностей совершаются вследствие дефор­мации деталей под нагрузкой и вибрации их, а также колебаний, проис­ходящих в упругих системах.

**ТЕМА 2. ИЗНОСОСТОЙКИЕ СТАЛИ**

Возможность продолжительной эксплуатации деталей машин и дру- гих изделий, их долговечность во многих случаях связаны с износо­стойкостью материалов, из которых они изготовлены.

Износ деталей машин и аппаратов может быть вызван трением металлических деталей друг о друга и воздействием рабочей среды — потоком жидкости или газа, царапанием твердых частиц о поверх­ность деталей и другими поверхностными процессами.

Механизм износа различен и зависит от условий износа, но в ос­новном он состоит в том, что с поверхности металла вырываются мелкие частицы. В случае обычного трения поверхность металла на­клепывается и сопротивляемость истиранию возрастает. Следова­тельно в данном случае способность металла к наклепу в существен­ной степени определяет его износостойкость. В случае абразивного износа, когда твердые частицы абразива (например, песка) вырывают мельчайшие кусочки металла, стойкость против износа будет опреде­ляться сопротивлением металла хрупкому разрушению и его твер­достью. При наличии агрессивных сред сопротивление износу зави­сит и от коррозионной стойкости материала. Прэтому износостой­кость сплава (стали) определяется его физико-химическими свойствами и условиями износа, причем в зависимости от условий износа оптимальная структура и свойства металла могут быть различными.

Стойкость против абразивного износа возрастает с увеличением твердости изнашиваемого материала, но для различных материалов в разной степени, поэтому эффективным повышением износостойкости является поверхностная закалка или другие методы повышения поверхностной твердости (цементация, азотирование и т. д.). При одинаковой поверхностной твердости стали со структурой мартенсит + карбиды обладают большей износостойкостью, чем стали с такой же твердостью, но не имеющие избыточных карбидов.

При одинаковой твердости сталь, имеющая крупнокристаллическую структуру, имеет меньшую износостойкость, чем сталь с мелкокристаллической структурой, так как у первой сопротивление хрупкому разрушению меньше.

Включения графита, ухудшающие механические свойства стали, повышают износостойкость при трении, так как в процессе изнашивания графитные включения выходят на поверхность трения, разрушаются по плоскостям спайности, образуя тончайшие пластинки и заполняю!' неровности трущихся поверхностей, тем самым предотвращая сухое трение металла о металл и схватывание. Другими словами, графитные включения выполняют роль смазки.

**Графитнзированная сталь**

Графитизированная сталь обладает высокой стойкостью против из¬носа. Графит в структуре получается за счет частичного разложения Цементита, поэтому графитизирующиеся стали должны иметь высокое содержание углерода и кремния (в качестве легирующей примеси), который повышает способность стали к графитизации.

Состав некоторых графитиэированных сталей приведен в табл. 3.

Таблица 1. Состав графитизированных сталей, %

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка стали | С | Si | Мn | Другие элементы |
| ЭИ293 | 1,50—1,75 | 0,75—0,95 | 0,20—0,40 |  |
| ЭИ336 | 1,50—1,70 | 0,70—1,00 | 0,15—0,40 | 0,4—0,7 Сu |
| ЭИ366 | 1,30—1,45 | 1,60—1,25 | 0,40—0,50 | 0,2—0,4 Ti |

Ограничено содержание следующих элементов: Ni < 0,2; Сr < < 0,08; S < 0,025; Р < 0,03.

В литом горячекатаном состоянии эти стали имеют структуру пластинчатого перлита с избыточными (часто в виде сетки) карбидами. Для получения необходи¬мого количества графита проводят графитизирующий отжиг. При этом пластинчатый перлит переводят в зернистый для улучшения обрабатываемости. Режим обработки в общем аналогичен режиму графитизирующего отжига ковкого чугуна и заклю¬чается в нагреве до 820—840°С с выдержкой около 5 ч, охлаждения до 700—720°С, выдержке 5—15 ч при этой температуре для частичной графитизации избыточного цементита. Дальнейшее охлаждение до 600°С — с печью, а от 600°С — на воздухе.

После такой обработки структура стали состоит из зернистого перлита с неко¬торым количеством мелких округлых" (точечных) графитных включений.

Детали из графитнэируемой стали можно применять в отожженном состоянии и после закалки с отпуском.

Отожженная графитизированная сталь превосходит по прочности высокопроч­ный чугун и обычную конструкционную углеродистую сталь (в нормализованном состоянии), уступая последней по пластичности:

Термически обработанную графитизированную сталь применяют для холодных штампов, калибров, тра­ков и других деталей, подвергающих­ся в работе большим давлениям и износу. В отожженном состоянии графитизированную сталь применяют как заменитель цветных металлов — латуни и бронзы.

Из графитизированной стали изготавливают литые коленчатые валы. Наличие графита повышает склонность стали к затуханию колебаний, а ее недостаточная прочность может быть компенсирована конструктивно — более выгодной формой отливок, чем поковки.

**Высокомарганцовистая сталь**

Как отмечалось, устойчивость против износа достигается обычно получением высокой поверхностной твердости. Однако существует аустенитная сталь, которая в условиях обычного трения, сопровож­даемого большим удельным давлением (и когда отсутствует чисто абразивный износ), при низкой твердости (всего лишь 200—250 НВ***)*** обладает высокой износоустойчивостью. Это так называемая ***сталь Гадфильда*** (Г13), содержащая 1,2 % С и 13 % Мn. Первая легированная сталь разработана Гадфильдом и запатентована в 1883 г.

Сталь применяют в литом и реже —в горячедеформированном виде.

Термическая обработка литых и кованых деталей (механической обработке сталь подвергается с большим трудом) заключается в за­калке в воде с 1050—1100°С. При быстром охлаждении в воде пол­ностью задерживается выделение карбидов и образуется чисто аустенитная структура (что обеспечивается при соотношении Мn : С >10).

Сталь обладает типичными для ауcтенитных сталей высокими вязкостью и пластичностью при достаточно хорошей прочности.

Примерные механические свойства этой литой и закаленной на аустенит стали следующие:

предел прочности (временное сопротивление) σв = 800-900 МПа;

условный предел текучести σ0,2 = 310-350 МПа;

относительное удлинение (пластичность) δ = 15-20 %;

относительное сужение ψ = 50-30 %;

твердость 180—220 НВ***.***

При низкой твердости сталь Гадфильда обладает необычно высокой износоустойчивостью при трении с давлением и ударами. Это объясняется повышенной способностью к наклепу значительно большей, чем у обычных сталей с такой же твердостью.

Чисто марганцевая аустенитная сталь Г13, в литом, а также ко­ваном состояниях, имеет явно выраженный порог хладноломкости, который повышается с увеличением содержания фосфора.

Раньше считалось, что сплавы с г. ц. к. решеткой не имеют порога хладно­ломкости и в стали Г13 допускалось высокое содержание фосфора — (до 0,12%). Однако исследования показывают, что стали с г. ц. к. так же как с решет­кой о. ц. к. склонны к хладноломкости. Поэтому и в стали Г13, используемой для ответственных отливок, следует жестко регламентировать содержание фосфора (не более 0,02 %).

Полагали, что такое высокое упрочнение при пластической деформации связано с образованием мартенсита деформации. Однако тщательные измерения показали, что прн самых больших деформациях, в том числе при низких температурах, не об­разуется больше чем 0,5—1,5 % мартенсита, а такое его количество не может суще­ственна повысить твердость стали.

Высокая упрочняемость стали Гадфильда при пластической деформации обуслов­лена тем, что деформация осуществляется преимущественно путем механического двойникования аустенита. С одной стороны, двойники являются эффек­тивными барьерами для движения дислокаций и поэтому упрочняют сталь. С другой стороны, двойники приводят к релаксации внутренних напряжений, предотвращая локализацию пластической деформации и образование трещин.

Высокая вязкость аустенита наряду с достаточной прочностью и износоустой­чивостью делает сталь Гадфильда незаменимым материалом для деталей, работающих на износ и удар одновременно.

Из стали Г13 изготавливают черпаки экскаваторов, траки гусениц тракторов, трамвайные крестовины, детали камнедробилок и другие детали. В этих деталях трение сопровождается ударами и большими давлениями; при абразивном износе, когда давление и, следовательно, наклеп отсутствуют, сталь Гадфильда не имеет существенных преимуществ в отношении износоустойчивости перед другими сталями такой же твердости.

Перечень отливок из марганцовистой стали 110Г13Л по ГОСТ 977-88:

* Била, катки и тяги
* Брони и плиты футеровочные
* Траки и коронки экскаваторов
* Болты броневые, коронки, станины
* Истирающие плиты, дробящие плиты
* Пластины для оборудования износостойкие
* Щеки, конуса и молотки для горного оборудования
* Зубчатые колеса, мелющие шары и билодержатели
* Била для шаровых мельниц, била для дробильных машин

**Стали с высокой кавитационной стойкостью**

Обычно это стали с структурно неустойчивым аустенитом. Образо­вание мартенсита при ударе водных струй весьма положительно влияет на кавитационную стойкость. Примером кавитационно стойкой стали может служить сталь марки 30Х10Г10 (0,3 % С; 10 % Сr; 10 % Мn). 0Х14Г12М

**ТЕМА 3. ИЗНОСОСТОЙКИЕ ЧУГУНЫ**

БЕЛЫЕ ЧУГУНЫ

Влияние примесей и легирующих элементов

Известен ряд литейных сплавов, обладающих высокой износостой­костью, но наибольшее распространение получили белые чугуны, обла­дающие рекордной износостойкостью в условиях абразивного износа.

Промышленные белые чугуны являются многокомпонентными же­лезоуглеродистыми сплавами, содержащими постоянные компоненты и примеси (кремний, марганец, фосфор, серу, азот, водород и кислород), а также различные легирующие компоненты.

Основной базовый компонент белых чугунов – железо

Железо - полиморфный металл, при атмосферном давлении до 911 °С имеет ОЦК-упаковку атомов, в интервале 911... 1392 °С - ГЦК и при бо­лее высоких температурах (до температуры плавления) опять восстанав­ливается ОЦК-упаковка, плотность - 7,874 г/см3.

Второй базовый компонент белых чугунов - углерод . В белых чугунах углерод обеспечивает образование цементита (Fе3С), характеризующегося ком­плексной межатомной связью и сложной ромбической решеткой, (Fе, Сr)7С3 с тригональной решеткой и других карбидов.

Цементит является основной фазой структурных составляющих многих износостойких чугунов. Плотность цементита Fе3С составляет 7,67 г/см3.

Карбиды - важнейшая составляющая износостойких чугунов, кото­рая в сочетании с другими фазами определяет износостойкость отливок. При затвердевании доэвтектических чугунов вначале кристаллизуется избыточный аустенит, а затем происходит одновременная кристаллиза­ция аустенита и цементита. Кристаллы первичного це­ментита имеют форму пластин, что объясняется анизотропией его кри­сталлического строения и сил межатомной связи. Комплексный характер межатомной связи и слоистая структура цементита обусловливают ани­зотропию свойств в белом чугуне.

Такие элементы как углерод, водород и азот образуют с железом растворы внедрения, а кремний, марганец, хром, фосфор и многие другие компоненты - твердые растворы замещения. Природа матричной фазы эвтектики в заметной степени определяет свойства белого чугуна. Обра­зование таких эвтектик, в которых ведущая карбидная фаза образует мат­рицу колоний, подобную ледебуриту обычного белого чугуна, обуслов­ливает повышенную хрупкость отливок.

Углерод с марганцем связывается в карбиды Мп3С, Мп7С3 и Мп23С6, причем карбид Мп3С изоморфен с карбидом Fе3С и образует с ним твер­дые растворы. На диаграммах состояния сплавов Fе-Мп видно, что эти металлы дают непрерывный ряд твердых растворов. Марганец способст­вует стабилизации аустенита и цементита в белых чугунах.

Марганец увеличивает количество центров кристаллиза­ции и скорость роста кристаллов цементита из эвтектической жидкости. При повышенном содержании С+Si в толстостенных отливках выделяет­ся силикокарбид (Fе, Мn)7SiС2 и уменьшается количество цементита.

Марганец и сера в значительной степени нейтрализуют друг друга. Марганец способствует повышению отбеливаемости чугуна и расширяет температурную область образования половинчатых структур. В отливках из доэвтектического белого чугуна содержание 0,9...2,2 % марганца не оказывает заметного влияния на первичную структуру. В высокомарган­цевых чугунах образуются карбиды типа (Fе, Мn)3С.

В отливках из высокомарганцевых чугунов наблюдается об­разование пластин большой протяженности, что приводит к повышению их хрупкости и появлению стекловидного излома.

Хром - обычный легирующий компонент белых износостойких чу­гунов. Сопоставление кинетических диаграмм кристаллизации хроми­стых чугунов, состав которых близкий к эвтектическому, показывает, что увеличение содержания хрома не оказывает заметного влияния на отно­сительное положение линии появления аустенита. С ростом содержания хрома выделение графита затрудняется.

Более значительное увеличе­ние прочности и других конструкционных свойств белого чугуна дости­гается при комплексном легировании доэвтектических расплавов.

В белых чугунах, используемых для изготовления быстроизнашивающихся деталей, во избежание графитообразования в толстостенных отливках содержание кремния не должно превышать 0,6...0,9 %, а со­держание карбидообразующих элементов повышаться до 16...34 %. В ка­честве карбидообразующего элемента для высоколегированных чугунов чаще всего используют хром, высокое сродство которого к углероду обу­словливает образование не только карбидов цементитного типа, но и ус­тойчивых специальных карбидов типа (Fе, Сr)7С3, (Fе, Сr)23С6, (Fе, Сr)4С и др. При испытании белых чугунов, легированных карбидообразующими элементами, определено, что интенсивность их изнашивания зависит не только от металлической основы, но и от природы и состава карбидов.

КЛАССИФИКАЦИЯ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ ПО МИКРОСТРУКТУРЕ

**С карбидами Ме7С3 и Ме23С6**

1. Мартенситные
2. Аустенитные
3. Ферригно- бейнитные
4. Бейнитно- аустенитные
5. Трооститно- мартенситные
6. Аустенитно- мартенситные
7. С легированным мартенситом
8. С легированным (зернистым) перли­том
9. Трооститные

**С карбидами Ме3С, МеС и (Fе, Ме)3С**

1. Перлитные
2. Ферритные
3. Аустенитные
4. Перлитно-ледебу- ритные
5. Трооститно- сорбитные (мартен­ситные)
6. Ледебуритные
7. Мартенситные
8. Бейнитно- аустенитные
9. С легированным ферритом

**С комплексными карбонитридами Ме(С, N) и карбидами Ме2С и Ме6С**

1. С легированным ферри­том
2. Мартенситно-троостит- ные
3. Аустенитно-мартенсит- ные
4. С легированным мартен­ситом
5. Ферритно-ледебуритные
6. Трооститно-мартенситные (сорбитные)
7. Ферритно-цементитные
8. Бейнитно-аустенитные
9. Аустенитно-ферритные
10. Перлитно-ледебуритные (с зернистым перлитом)

В условиях отсутствия больших ударных нагрузок наилучшим изно­состойким материалом является белый чугун, состав которого выбирают в зависимости от величины реально действующих напряжений, темпера­туры и характера износа. С увеличением нагрузок содержание углерода и фосфора должно уменьшаться.

Наилучшим критерием износостойкости белого чугуна при абразив­ном износе в условиях высоких температур является его горячая твер­дость. Для повышения жаростойкости и жаропрочности такого чугуна наиболее часто используют легирующие элементы: никель, алюминий, хром, ванадий, молибден, вольфрам и др.

Для практических целей по изготовлению литых деталей с повы­шенной износостойкостью и твердостью могут быть рекомендованы вы­сокохромистые чугуны, содержащие 12... 14 % (мае.) хрома.

При введении в чугуны доэвтектического состава все эти элементы повышают прочность и устойчивость ледебурита и перемещают кривые изотермического превращения аустенита вправо, что обес­печивает повышение устойчивости аустенита в износостойких отливках. Естественно, что химический состав сплава, размеры отливок и условия, в которых осуществляется их охлаждение, в значительной мере предо­пределяют степень легированности металлической основы чугуна, его физико-механические и эксплуатационные свойства. Кроме того, эти элементы - активные карбидообразующие металлы.

Элементы, увеличивающие отбеливаемость чугуна, можно распо­ложить в порядке возрастания эффективности их влияния*:* марганец, молибден, хром, ванадий и теллур.

Увеличивают склонность к отбеливанию модифицирующие компо­ненты: магний, церий и другие РЗМ

При кристаллизации белого чугуна значительное влияние оказыва­ют элементы, обладающие бльшим, чем железо, сродством к углероду, такие как титан, цирконий, ниобий и ванадий. Вследствие образования карбидов при легировании расплавов доэвтектического состава этими элементами жидкая фаза обедняется углеродом. При микролегировании чугуна эти элементы преимущественно связываются в нитриды, что практически не влияет на переохлаждение расплава, и только при пони­женном содержании азота в чугуне образуются карбиды.

При низком легировании чугунов, т.е. при повышении содержания карбидообразующих элементов до 1...3 %, отмечается появление карби­дов на границах дендритов и карбонитридов на участках цементита. Микроструктура легированного чугуна характеризуется очень тонким дендритным строением, а междендритные пространства заполнены тон­кой цементитной эвтектикой и компактными включениями структурно­свободного цементита.

Наиболее высокую твердость (535...712 НV) имеют отливки из бе­лого чугуна, легированного ванадием и титаном. При гидро-и газоабра­зивном изнашивании такие отливки имеют высокую эксплуатационную стойкость, которая значительно превышает стойкость высокохромистых чугунов. Белые чугуны с содержанием карбидообразующих элементов от 3 до 6 % имеют мелкозернистую структуру и высокое сопротивление истиранию.

По своему влиянию на механические свойства белого чугуна при введении 3...6% карбидообра­зующих элементов наименее эффективен цирконий, который заметно снижает динамическую прочность отливок.

Постоянные примеси белого чугуна - сера и фосфор - образуют с железом химические соединения FеS, FеS2 и FеS3, которые в процессе затвердевания существенно влияют на структурообразование. Сера спо­собствует отбеливанию чугуна, увеличивает его усадку и склонность к об­разованию трещин и отрицательно влияет на физико-механические свойст­ва. Износостойкость чугуна с повышением содержания серы уменьшается. При содержании в белом чугуне доэвтектического состава более 0,2 % серы отмечается охрупчиваемость литых изделий из-за увеличения коли­чества структурно-свободного цементита и укрупнения размеров суль­фида марганца. Особенно низкие значения динамической прочности бе­лого чугуна отмечаются при содержании серы от 0,2 до 0,4 %.

Структура, образующаяся в отливках в процессе затвердевания сплавов Fе-Р-С, существенно отличается от железоуглеродистых спла­вов эвтектического типа. Растворимость фосфора в у-железе при темпе­ратурах 400...500 °С составляет 0,50...0,54 %. Фосфид Fе3Р и кристаллы у-раствора образуют эвтектику. Фосфидная эвтектика при низких темпе­ратурах обладает высокой твердостью.

Исследования белых чугунов, содержащих 2,0...2,5 % углерода и 0,7...7,0 % фосфора, показали, что вследствие образования легкоплавкой фосфидной эвтектики снижается температура начала кристаллизации, увеличивается переохлаждение и повышается твердость. При этом со­противление изнашиванию резко уменьшается, так как в процессе абра­зивного износа отдельные включения фосфидной эвтектики легко вы­крашиваются.

Износостойкость чугуна при абразивном воздействии зависит от его микроструктуры (микротвердости, формы, взаимного расположения и количества структурных составляющих).

Основные структурные составляющие чугуна располагаются по воз­растанию микротвердости в следующем порядке: графит, феррит, перлит, аустенит, мартенсит, цементит, легированный цементит, специальные карбиды хрома, вольфрама, ванадия и других элементов, бориды.

Износостойкость находится в сложной зависимости от количествен­ного соотношения и распределения твердой и хрупкой фаз, а также срав­нительно мягкой и пластичной основы. Металлическая основа должна прочно удерживать твердую составляющую и предотвращать ее хрупкое разрушение.

Некоторые износостойкие чугуны с метастабильной металлической основой могут в определенных условиях изнашивания обладать такой же износостойкостью, как и мартенситные. Так, закаленные образцы из чугуна марки ИЧХ12М с аустенитной осно­вой имеют износостойкость, соответствующую износостойкости чугунов с мартенситной основой. Наличие большого количества остаточного ау­стенита приводит, как правило, к снижению износостойкости в условиях абразивного износа даже при малых углах атаки и отсутствии значитель­ных ударных нагрузок. При значительных ударных нагрузках и повто­ряющихся высоких напряжениях предпочтительной является аустенитная металлическая основа.

В белых износостойких чугунах первичный аустенит устойчивей вторичного, получаемого при аустенизации отливок. Понижение устой­чивости вторичного аустенита объясняется накоплением дефектов кри­сталлического строения при фазовых превращениях в твердом состоянии и меньшей концентрацией углерода. Низкоуглеродистые белые чугуны можно подразделить по признаку повышения износостойкости на сле­дующие группы: с уменьшенным объемом бывших аустенитных участ­ков и увеличенным количеством эвтектики; с увеличенной микротвердо­стью в бывших аустенитных участках; с наиболее высокой твердостью бывших аустенитных участков, максимально приближающейся к твердо­сти цементита и со значительным содержанием вторичных карбидов и уменьшенным количеством эвтектики.

Для получения аустенитно-карбидной структуры в хромистых чугу­нах требуется более 23 % хрома, а аналогичная структура в марганцевых чугунах достигается при содержании 7... 10 % марганца. Это объясняет, в частности, тенденцию поддерживать в износостойких чугунах (типа 230X28, 260Х28М5, 280Х12М и др.) высокие концентрации карбидообра­зующих элементов. Несмотря на высокое содержание карбидообразущих элементов, эти чугуны характеризуются низкой износостойкостью в ус­ловиях абразивного износа.

Мартенситно-аустенитную основу в белом чугуне можно получить при значительно меньших концентрациях хрома, но при условии допол­нительного легирования никелем, что широко используется на практике при производстве износостойких отливок из чугунов типа нихард. При содержании в белом чугуне до 2,0 % хрома и до 3,0 % никеля получается мартенситно-аустенитная структура с цементитной эвтектикой, обла­дающая высокой износостойкостью.

В ряде случаев могут быть рекомендованы износостойкие белые чу­гуны, содержащие 12,5...24 % хрома и 8,0...18,5 % марганца, имеющие хорошую прокаливаемость и высокую относительную износостойкость.

Испытания хромомарганцевых чугунов в различных условиях изнашивания показали, что их высокая износостойкость в зна­чительной степени зависит от первоначальной структуры, состоящей из большого количества карбидов и ледебурита в вязкой аустенитно- мартенситной основе. Благоприятное влияние на структуру и эксплуата­ционные свойства износостойких отливок оказывают легирующие эле­менты, которые уменьшают эвтектичность чугуна (титан, цирконий и др.).

Комплексно-легированные износостойкие чугуны

Высокохромистые чугуны (ИЧХ20М, Х34, ИЧХ28Н2 и др.) из-за на­личия крупных карбидов имеют низкую пластичность и поэтому не при­меняются в условиях, связанных со значительными ударными нагрузка­ми. Микротвердость металлической основы для указанных чугунов изме­няется в очень широких пределах: от 3109 до 15109 Па.

Значительное повышение износостойкости белого чугуна, связанное с изменением первичной структуры, наблюдается при легировании кар­бидообразующими элементами. Комплексное легирование карбидообра­зующими элементами доэвтектического чугуна с содержанием 2,1...3,1% углерода и 0,8 ... 1,3% кремния обеспечивает его высокую износо­стойкость и достаточную прочность.В особо жестких условиях наибольшей износостойкостью, в том числе и против эрозионного износа, отличаются мартенситные чугуны типа нихард и высокохромистые чугуны с содержанием более 12 % хро­ма и 0,8... 1,6 % молибдена.

Молибден образует собственные карбиды типа Мо2С, может входить в состав комплексных карбидов (Ме, Мо)7С3 и растворяется в матрице. Количество молибдена в матрице тем выше, чем больше молибдена со­держится в сплаве. Условия, при которых происходит выделение из аустенита вторичных карбидов, определяют микроструктуру и механиче­ские свойства мартенсита и, следовательно, отливок из хромомолибдено­вых белых чугунов.

В чугунах с 1,5...4,3 % углерода, легированных хромом в количест­ве 12... 14 % и молибденом 1,4... 1,6 %, прокаливаемость резко снижается при увеличении содержания углерода,

Высокохромистые чугуны с содержанием 1,4... 1,6 % молибдена (см. рис. 2.5, а) обладают сравнительно высокой прокаливаемостью. При увеличении содержания углерода более 2,5 % прокаливаемость этих чугунов уменьшается и перлитное превращение при закалке на воздухе можно подавить только в отливках с толщиной стенки до 30 мм. При производстве деталей, подвергающихся абразивному и эрози­онному воздействиям, используются высокохромистые белые чугуны, легированные марганцем и молибденом. Концентрация молибдена в твердом растворе при равном содержании в хромомарганцево-молибде- новом чугуне значительно выше, чем в хромомолибденовом чугуне.увеличение содержания молибдена в твердом растворе резко тормозит перлитное превращение, поэтому при производстве высокохромистых чугунов важное значение отводится вы­бору оптимального соотношения легирующих элементов, используемых при его комплексном легировании.

Для толстостенных деталей следует выби­рать чугуны, обладающие высокой прокаливаемостью, но содержащие меньше углерода.

чугуны с меньшим содержанием хрома в нейтральных средах за счет большего содержания карбидов часто обладают более высокой стойкостью в условиях абразивного изнашивания типа микроре­зания.

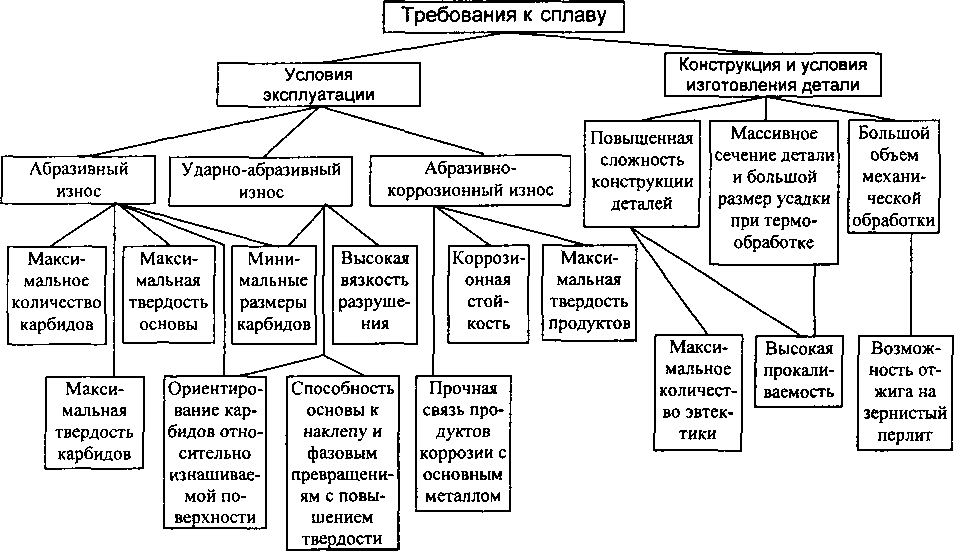
С повышением скорости кристаллизации массивных отливок увели­чивается микротвердость матрицы, износостойкость и прочность чугуна.Для достижения максимальной износостойкости при удовлетвори­тельной прочности используют белые безникелевые чугуны с содержа­нием 12...20 % хрома и 2,2...2,8 % углерода. Высокая стойкость их в ус­ловиях абразивного изнашивания по сравнению со сталью объясняется наличием в структуре значительного количества (20...50 %) твердых карбидных включений, которые затрудняют микрорезание поверхности деталей.С увеличением размеров и количества карбидов типа Ме3С в струк­туре прочностные свойства и износостойкость чугуна снижаются. Для чугунов с мелкими карбидами типа МеС износостойкость повышает­ся. К последним относятся титанованадиевые чугуны.

Титан и ванадий эффективно измельчают структуру и повышают износостойкость белых чугунов. Воздействие ванадия на структуру чугуна наиболее эффективно при невысоком углеродном эквиваленте (Сэ < 3,5 %), что соответствует со­держанию 3,0...3,3 % углерода, 0,8...1,2 % кремния и до 0,2 % фосфора при сочетании верхнего предела углерода с нижним содержанием крем­ния, и наоборотПри комплексном легировании доэвтектического чугуна ванадием (6...9 %), кремнием (1...2 %) и медью (1... 1,5 %) получаются структуры, состоящие из ванадиевой эвтектики, тонкодисперсной ферритно- карбидной матрицы и отдельных карбидов компактной формы.

Ванадий повышает температуры ликвидуса и эвтектического пре­вращения. При увеличении содержания ванадия с 2,0 до 15 % в белых чугунах с 2,4 до 2,5 % углерода температура ликвидуса повышается на 150 °С. Ванадий уменьшает растворимость углерода в у-железе с повышенной устойчивостью а-фазы. Исследование карбидной фазы вана­диевых чугунов показало, что во всех образцах с высокой износостойко­стью присутствуют карбиды разной формы, микротвердость которых зна­чительно превышает микротвердость хромистых карбидов и в ряде случаев приблизилась к твердости корунда. Имеются и комплексные вытянутые карбиды ванадия, которые при температуре 1100 °С коагулируют, причем преимущественно цементитная часть карбида растворяетсяПоиски путей усовершенствования существующих износостойких хромомарганцевых чугунов привели к созданию сплавов ИЧХ15М2Ф, ИЧХ20Г7М и ИЧХ15ГЗМ, содержащих 1,7...2,9 % углерода. Высокая сопротивляемость гидроабразивному изнашиванию этих чугунов дости­гается за счет получения структур, содержащих раздробленные карбиды (Сr, Fе)7С3, мелкодисперсные вторичные карбиды (Сr, Fе)2зС6 и аустенит- но-мартенситную матрицу. Оптимальные значения твердости износо­стойкости и структуры, обеспечивающей упрочнение литых изделий под действием пластической деформации, формируются после нормализации отливок с температур 950... 1070 °С.Стойкость поверхностного слоя отливок против гидроабразивного износа определяется не только структурой материала, но и способностью этой структуры к упрочнению или структурным превращениям под дей­ствием пластической деформации.

Для изготовления рабочих колес песковых насосов и других дета­лей, работающих в условиях гидроабразивного изнашивания, обычно используют сплавы типа ИЧХ12Г5, ИЧХ28Н2 и 110Г13Л. Улучшение литейных и физико-механических свойств сплавов достигается использо­ванием модифицирования расплава редкоземельными металлами и мо- либдатом кальция.

Для управления структурообразованием износостойких чугунов мо­гут быть использованы не только традиционные металлургические мето­ды - легирование, перегрев расплава и модифицирование, но и физиче­ские методы обработки жидкого и кристаллизующегося расплава - воз­действие вибрацией и ультразвуком, электрическими, магнитными и электромагнитными полями. Во многих случаях последние методы могут оказаться эффективнее и экономичнее традиционныхПредставляет интерес совместное влияние физических и металлургиче­ских методов на кристаллизующиеся расплавы, обеспечивающие износо­стойким отливкам мелкозернистую структуру и высокие эксплуатацион­ные свойства.



**ТЕМА 4. ИЗНОСОСТОЙКИЕ ЦВЕТНЫЕ СПЛАВЫ**

МЕДЬ И ЕЁ СПЛАВЫ

Медь действительно цветной металл: в зависимости от чистоты и состояния поверхности цвет изменяется от розового до красного. Её порядковый номер 29, удельный вес 8,94 г/см3, кристаллическая решетка ГЦК с периодом 0,3608 нм. Медь плавится при температуре 1083 °С, не имеет полиморфных превращений, обладает высокой электропроводностью и теплопроводностью, высокими технологическими свойствами: хорошо паяется, сваривается, легко обрабатывается давлением

Таблица 2- Химический состав меди

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка меди | М00 | М0 | М1 | М2 | М2р | М3 | М4 |
| Содержание меди, % | 99,99 | 99,95 | 99,90 | 99,70 | 99,70 | 99,50 | 99,00 |

Благодаря высокой электропроводности медь нашла широкое применение в электротехнике. Из меди изготавливают шины, ленты, кабели, обмотки электродвигателей и др. Примеси изменяют свойства меди.

Медные сплавы по технологическим свойствам подразделяются на *деформируемые* (при получении листов, полос, профилей, проволоки) и *литейные* (при получении отливок в песчаные или металлические формы). По способности упрочняться в результате нагрева медные сплавы делятся на упрочняемые и *не упрочняемые* термической обработкой. По химическому составу более широко известно деление медных сплавов на *латуни* и *бронзы*.

**Латуни**

В *латунях* главным легирующим элементом является цинк (Zn). Латуни получили широкое распространение благодаря сочетанию высоких механических и технологических свойств. Структура и свойства латуней определяется диаграммой состояния «Cu – Zn».

Содержание цинка в кристаллической решетке может достигать 39 %. Латуни, состоящие из меди и цинка, называют *простыми*. Они могут быть однородными (до 39 % цинка) и двухфазными (более 39 % цинка). Однофазные латуни имеют высокую пластичность, т. к. состоят из однофазного α-твёрдого раствора. Двухфазные латуни при наличии β-фазы имеют более высокую прочность, но пластичность при этом снижается.

Простые латуни маркируются буквой «Л» и цифрой, показывающей процентное содержание меди. Латунь Л80 содержит 80 % меди и 20 % цинка. Простые латуни поставляются в виде листов, ленты, прутков, проволоки и согласно ГОСТ 15527-70 имеют обозначение Л96, Л90,…, Л59.

Специальные (многокомпонентные) латуни содержат и другие легирующие элементы: алюминий (Al), никель (Ni), марганец (Mn), олово (Sn) и др. Алюминий, кремний, марганец и никель повышают механические свойства латуни и сопротивление коррозии, а свинец улучшает обрабатываемость резанием. В специальных латунях после буквы «Л» следуют буквы русского алфавита, обозначающие легирующий элемент:

***А – Al, Н – Ni, К – Si, С – Pb, О – Sn, Ж – Fe, Mц – Мn, Ф – Р, Б – Ве, Ц – Zn*.**

Цифры после букв показывают среднее содержание меди и легирующих элементов в %. Например: ЛК 80–3 содержит 80 % меди, 3 % кремния, 17 % цинка.

**Марганец** повышает прочность и коррозионную стойкость, особенно в сочетании с алюминием, оловом и железом.

**Олово** повышает прочность и сильно повышает сопротивление коррозии в морской воде. Латуни, содержащие олово, часто называют морскими латунями.

**Никель** повышает прочность и коррозионную стойкость в различных средах.

**Железо** измельчает зерно, повышает температуру рекристаллизации и твердость латуни.

**Кремний** повышает прочность, коррозионную стойкость, антифрикционные свойства, а **марганец** — жаростойкость латуни.

При совместном легировании кремнием и свинцом повышаются антифрикционные свойства латуни и она может служить заменителем более дорогих, например оловянных бронз, применяющихся в подшипниках скольжения.

**Мышьяк** предохраняет латунь от обесцинкования в агрессивных пресных водах при комнатной и повышенных температурах. Добавки никеля, мышьяка и железа к алюминиевым латуням повышают их стойкость к щелочам и разбавленным кислотам. **Свинец**, практически не растворимый в медной основе, располагается в виде дисперсных частиц в объеме зерен и по их границам, ухудшает механические свойства, но улучшает обрабатываемость резанием. Свинец — своеобразная смазка, уменьшающая износ инструмента при обработке резанием латуни. Им легируют (1-2%) латуни, которые подвергаются механической обработке на станках-автоматах. Поэтому эти латуни называют автоматными.

Простые и специальные латуни относятся к деформируемым сплавам и используются как конструкционный материал там, где требуются высокая прочность и коррозионная стойкость: в трубопроводной арматуре, в химическом машиностроении и особенно в судостроении. Изготавливают из латуней листы, ленту, проволоку, а затем из этого проката – радиаторные трубки, снарядные гильзы, трубопроводы, шайбы, гайки, втулки, уплотнительные кольца, токопроводящие детали электрооборудования.

Кроме деформируемых латуней, применяются и литейные латуни, которые содержат большое количество добавок для улучшения литейных свойств. Их обозначение отличается от деформируемых латуней. В них содержание компонента указывается после буквы обозначения: ЛЦ40Мц3Ж – содержит 40 % Zn, 3 % Mn, 1 % Fe, остальное медь.

По ГОСТ 17711-93 латуни литейные бывают:

Латунь свинцовая ЛЦ40С

Латунь марганцовая ЛЦ40Мц1,5

Латунь марганцово-железная ЛЦ40МцЗЖ

Латунь марганцово-алюминиевая ЛЦ40МцЗА

Латунь марганцово-свинцовая ЛЦ38Мц2С2

Латунь марганцово-свинцово-кремнистая ЛЦ37Мц2С2К

Латунь алюминиевая ЛЦ30А3

Латунь оловянно-свинцовая ЛЦ25С2

Латунь алюминиево-железо-марганцовая ЛЦ23А6ЖЗМц2

Латунь кремнистая ЛЦ16К4

Латунь кремнисто-свинцовая ЛЦ14КЗСЗ

Механические свойства литейных латуней существенно зависят от способа получения отливок – песчано-глинистые формы, керамические или кокиль. Из литейных латуней изготавливают паровые и воздушные клапаны, корпуса кранов, пробки топливной и воздушной аппаратуры.

**Бронзы** – это сплавы меди со всеми другими элементами: оловом, алюминием, кремнием, бериллием и др. Бронзы различают по химическому составу и состоянию обработки. В некоторых случаях прочность таким способом может быть повышена до 750 МПа, по сравнению с обычной прочностью двухкомпонентных бронз – 400–500 МПа.

Бронзу называют по наличию легирующего элемента в её составе: *алюминиевая*, *оловянистая*, *кремнистая*, *бериллиевая* и т. д. Бронзы маркируют буквами «Бр» (бронза), за которыми следуют буквы и цифры, указывающие на состав и содержание в % легирующих элементов. Например: Бр ОЦС 4–4–2,5 содержит 4 % олова, 4 % цинка, 2,5 % свинца, остальное медь; Бр КМц 3–1 содержит 3 % кремния, 1 % марганца, остальное медь.

*Оловянистые* бронзы известны с бронзового века. Они, как и другие сплавы, делятся на деформируемые (< 10 % Sn) и литейные (> 10 % Sn).

В прошлом бронзы получили название в зависимости от их назначения: *колокольная* (20–30 % олова), *зеркальная* (30–35 % олова), *монетная* (4–10 % олова), *пушечная* (8–18 % олова). Оловянистые бронзы отличаются хорошими литейными свойствами – высокой жидкотекучестью и малой усадкой. С целью экономии олова в бронзы добавляют цинк в таком количестве, чтобы он полностью растворялся в меди, образуя твёрдый раствор, тем самым повышая механические свойства. Для улучшения обрабатываемости резанием в оловянистые бронзы добавляют свинец (например, БрО6Ц4С17: 6 % Sn, 4 % Zn, 17 % Pb, остальное Cu).

Литейные оловянистые бронзы, обладающие высокой коррозионной стойкостью в воде и на воздухе, применяются для пароводяной арматуры.

Деформируемые оловянистые бронзы характеризуются более низким содержанием олова (например: Бр ОЦ4–3 содержит 4 % Sn, 3 % Zn, остальное медь) и имеют однофазную структуру твёрдого раствора. После холодной обработки давлением бронзы подвергаются отжигу при 600–700 °С. Они пластичны и более прочны, чем литейные. Кроме того, деформируемые оловянистые бронзы обладают высокими упругими свойствами, поэтому их используют для получения пружин, мембран и др.

*Алюминиевые бронзы* обычно содержат от 5 до 10 % алюминия. Механические и коррозионные свойства этих бронз выше, чем у оловянистых. Алюминиевые бронзы можно подвергать закалке и старению. Однофазные алюминиевые бронзы (Бр А7) более пластичны, чем двухфазные, и относятся к деформируемым. Они обладают высокой прочностью и пластичностью (σВ = 400–450 МПа, δ = 60 %).

Легируют алюминиевые бронзы железом, никелем, марганцем и др. для устранения литейных недостатков и увеличения механических свойств после упрочняющей термической обработки (закалки с последующим старением). Например, у бронзы Бр АЖН10–4–4 (10 % Al, 4 % Fe, 4 % Ni, остальное медь) твёрдость увеличивается от 1500 до 4000 НВ; из неё изготавливают седла клапанов, направляющие втулки, шестерни и др.

*Кремнистые бронзы* содержат до 3 % кремния и являются заменителями оловянистых бронз; для улучшения механических свойств их дополнительно легируют никелем и марганцем. Ввиду их высокой упругости и антикоррозионных свойств, эти бронзы применяются для изготовления упругих элементов различных механизмов. Из бронзы Бр КМц3–1 (3 % Si, 1 % Mn, остальное медь) изготавливают стопорные и упорные кольца насосов, мембраны датчиков давления.

*Свинцовые бронзы* обладают высокими антифрикционными свойствами, хорошей теплопроводностью (например, Бр С30), поэтому из них изготавливают вкладыши подшипников, работающих при больших давлениях и скоростях.

*Бериллиевые бронзы* содержат не более 2,5 % бериллия (например, БрБ2: 2% Be, остальное медь). Бериллий образует с медью твёрдый раствор переменной растворимости, и, следовательно, такие бронзы можно подвергать упрочняющей термической обработке (закалке от 780 °С с последующим старением от 320 °С). После термической обработки повышаются как прочностные, так и упругие свойства: σВ = 1500 МПа, τУПР = = 600–740 МПа. Бериллиевую бронзу применяют в виде пружин в часовых механизмах, электроаппаратуре, в качестве упругих контактов.

АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

Алюминий – металл серебристо-белого цвета, имеет кристаллическую ГЦК решетку, температуру плавления 660 °С, удельный вес 2,7 г/см3, обладает высокой электропроводностью и теплопроводностью, коррозионной стойкостью за счет образования на поверхности защитной оксидной плёнки, малой прочностью (σВ = 60–80 МПа) и твёрдостью (250 НВ), но пластичен (δ = 35–50%). При пластической деформации значительно наклёпывается (σВ = 150–180 МПа, δ = 1,5%, 450 НВ).

Технический алюминий выпускается в виде деформируемого полуфабриката (листы, профили, прутки и др.).

Механические свойства алюминия зависят от его чистоты и состояния. Увеличение содержания примесей и пластическая деформация повышают прочность и твёрдость алюминия.

Алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью к морской воде, органическим кислотам, устойчив в нейтральных растворах солей магния, натрия. Химическая стойкость алюминия различной чистоты обуславливается образованием на его поверхности тончайшей, но плотной беспористой плёнки окиси алюминия Al2O3.

В машиностроении чистый алюминий практически не используется. Основное применение алюминия – это производство сплавов, достоинство которых в малом удельном весе.

Повышенной пластичности (Д18п, АК6)

Антифрикционные гранулированные (Аl-Sn, Al-Pb)

Алюминиевые сплавы

Деформируемые

Литейные

Не упрочняемые термообработкой

Упрочняемые термообработкой

Не упрочняемые термообработкой

Упрочняемые термообработкой

Повышенной пластичности, свариваемости, коррозионной стойкости

(AMг, АМц)

Нормальной прочности (Д1) Д16)

Высокопрочные (В95, ВАД-23)

Жаропрочные

(АК4, АК4-1)

Коррозионно-стойкие (АД31, АД33, АВ)

Порошковые

Не упрочняемые термообработкой

Упрочняемые

термообработкой

Низкой   
прочности (АК12)

Антифрикцион-  
ные (А09-2)

Нормальной прочности (АК9, АК7)

Высокопрочные (АМr10, AК8М)

Жаропрочные (АМ5)

Высокопрочные гранулированные

(Al-Fe, Al-Ni, AlCo)

Жаропрочные (САП-1, САП-2)

С низким ТКЛР и высоким Е (САС-1, САС-2)

Жаропрочные

Механически   
легированные

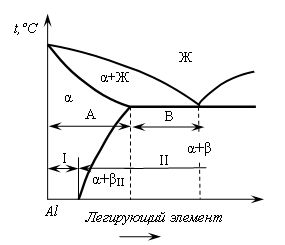
(Al-C)

Гранулирован-  
ные (Al-Cr, Al-V,

Al-Zr)

Рис. 1. Классификация алюминиевых сплавов

Алюминиевые сплавы классифицируют по технологии изготовления, способности к упрочнению термической обработкой и свойствам   
(рис. 1.). Технические алюминиевые сплавы подразделяют на две группы: применяемые в деформированном виде (прессованном, катаном, кованном) и в литом (*деформированные* и *литейные* сплавы). Границу между сплавами этих групп определяет предел насыщения твёрдого раствора при эвтектической температуре (рис. 2).



*Легирующий элемент*

*Al*

α+β

α+Ж

B

A

I

II

α+βII

*α*

Ж

*t, 0C*

Рис. 2. Диаграмма состояния «Алюминий – легирующий элемент»

Деформируемые и литейные алюминиевые сплавы подразделяются на *не упрочняемые* и *упрочняемые* в результате термической обработки.

Основными легирующими элементами алюминиевых сплавов являются медь, магний, кремний, марганец, цинк, реже литий, никель, титан. Легирующие элементы повышают температуру рекристаллизации алюминия (рис. 3). Многие легирующие элементы образуют с алюминием твёрдые растворы ограниченной переменной растворимости и промежуточные фазы СuАl2, Mg2Si и др. Это даёт возможность подвергать сплавы упрочняющей термической обработке, состоящей из закалки на пересыщенный твёрдый раствор и естественного или искусственного старения.

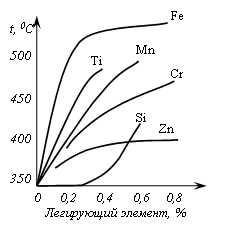


Рис. 3. Влияние легирующих элементов на температуру рекристаллизации алюминия

К деформируемым сплавам, *не упрочняемым* термической обработкой, относятся сплавы *АМц* и *АМг*.

*Сплавы типа АМц* (АМц1) относятся к системе «Аl – Мn»; структура состоит из α-твёрдого раствора и вторичных выделений фазы МnАl6, переходящих в твёрдый раствор при повышении температуры. При легировании железом вместо МnАl6 образуется сложная тройная фаза (Мn, Fе)Аl6, которая не растворяется в алюминии, поэтому эти сплавы не упрочняются термической обработкой. В отожженном состоянии обладают высокой пластичностью (δ = 18–22 %) и низкой прочностью (σВ = 130 МПа).

*Сплавы типа АМг* (АМг1, АМг5) относятся к системе «Аl – Мg». Магний образует с алюминием α-твёрдый раствор, концентрация которого при повышении температуры увеличивается от 1,4 до 17,4 % в результате растворения фазы Мg2Аl3. Сплав АМг в отожженном состоянии имеет   
σВ = 190 МПа, δ = 23 %

К *деформируемым* сплавам, *упрочняемым* термической обработкой, относятся сплавы системы «Аl – Сu». Они характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности. Наиболее характерными представителями этих сплавов являются дуралюмины, широко применяемые в авиа-, судо- и ракетостроении. Согласно диаграмме «Аl – Сu» (рис. 4), медь с алюминием образуют твёрдый раствор, максимальная концентрация меди в котором 5,65 % при эвтектической температуре. С понижением температуры растворимость меди уменьшается, достигая 0,1 % при 20 °С. Из твёрдого раствора выделяется θ-фаза – СuАl2, содержащая 54,1 % Сu. Она имеет объёмноцентрированную тетрагональную кристаллическую решетку и обладает сравнительно высокой твёрдостью. В сплавах дополнительно легированных магнием образуется ещё ς-фаза (Аl2СuМg) с ромбической кристаллической решеткой.

Маркируются дуралюмины буквой «Д» и цифрой, означающей номер сплава, например: Д1, Д16, Д20 и т. д. Поставляются в виде сортового проката в отожженном и термически упрочненном состоянии. Упрочняющая термическая обработка состоит из закалки и естественного старения.

Кроме дуралюминов, к термически упрочняемым деформируемым сплавам относятся следующие алюминиевые сплавы:**ковочные**(АК4-1, АК6, АК8 и т. д.), маркируемые буквами АК, и **высокопрочные** (В95, В96 и т. д.), маркируемые буквой В.

По химическому составу **ковочные сплавы** близки к дуралюминам, отличаясь от них более высоким содержанием кремния. Детали из ковочных сплавов подвергают закалке от 500–575 °С и старению при 150–165 °С. Дополнительное легирование Ni, Fe, Ti повышает температуру рекристаллизации и жаропрочность этих сплавов до 300 °С, что позволяет использовать их при изготовлении поршней, лопаток, дисков осевых компрессоров турбореактивных двигателей и т. п.

***Высокопрочные алюминиевые сплавы*** принадлежат к системе «Аl –Ζn–Мg–Сu» и содержат добавки марганца, хрома, циркония. Эти элементы увеличивают неустойчивость твердого расплава, ускоряют   
его распад и усиливают старение сплава. Наибольшее упрочнение вызывают закалка с температур 465–475 °С и старение при 140 °С. После такой обработки сплав В95 имеет σВ = 569–600 МПа,   
δ = 9–12 %, 1500 НВ. Сплавы применяют для высоконагруженных деталей и конструкций, работающих в условиях напряжения сжатия.

Основные требования к ***литейным*** алюминиевым сплавам – сочетание хороших литейных свойств (высокой жидкотекучести, небольшой усадки, малой склонности к образованию горячих трещин и пористости) с оптимальными механическими и химическими (сопротивление коррозии) свойствами.

Лучшими литейными свойствами обла­дают сплавы эвтектического состава. Больше распространены сплавы на ос­нове систем А1—Si, А1—Сu, А1—Mg.

Конструкционные сплавы систем А1—Si (АЛ2) и А1—Si—Mg (АЛ4, АЛ9, АЛ34) получили название силумины. АЛ2 близок к эвтектическому составу (10—13% Si) и отличается высокими ли­тейными свойствами, коррозионной стойкостью, большой плотностью отли­вок. Вто же время структура сплава АЛ2, представляющая собой игольча­тую грубую эвтектику с включениями кристаллов первичного кремния, не обеспечивает требуемых механических свойств материала. Повышение пла­стичности сплава за счет изменения структуры (измельчение структуры эв­тектики, появление избыточных кристаллов α-твердого раствора вместо кремния) достигается модифицированием АЛ2 натрием (0,065%) посредст­вом введения в расплав смеси солей (67% NaF + 33% NaCl). Тер­мической обработкой сплав АЛ2 не упрочняется.

Для легирования силуминов используют магний, медь, марганец, титан. Растворяясь в алюминии, они повышают прочность, твёрдость. Медь улучшает обрабатываемость резанием, титан оказывает модифицирующее действие. Медь и магний, обладая переменной растворимостью в алюминии, способствует упрочнению силуминов при термической обработке, состоящей из закалки и искусственного старения. Легированные силумины АЛ4, АЛ9, АЛ34 упрочняются термической обработкой. Силумины обладают хорошими литейными свойствами, удовлетворительной обрабатываемостью резанием, свариваемостью и коррозийной стойкостью, для повышения которой детали анодируют и защищают лакокрасочными покрытиями. Сплав АЛ2 используют для изготовления мелких, а АЛ4 и АЛ9 — средних и крупных литых деталей (корпусов компрессоров, картеров двигателей внутреннего сгорания). Сплав АЛ34 (ВАЛ5) превосходит сплавы АЛ4 и АЛ9 по прочности на 25—50%. Сплав АЛ34 применяется для отливок, получаемых литьем под давлением (блоков цилиндров автомобильных двигателей), и отличается хорошим комплексом технологических свойств.

**Высокопрочные и жаропрочные литейные сплавы.** В эту группу входят сплавы систем А1—Сu—Mn (AJI19), А1—Сu—Mn—Ni (AJI33) и А1—Si—Сu—Mg (АЛ3, AJI5).

Легирование сплава AJI19 титаном обеспечивает ему высокие механические свойства (в том числе при динамическом нагружении) при комнатной и низких температурах, а дополнительное легирование церием и цирконием — жаро­прочность при температурах до 300 °С. Сплав отличается хорошей обраба­тываемостью резанием и свариваемостью, но пониженной коррозионной стойкостью. Сплав AJI19 упрочняется термообработкой; он широко используется для литья крупногабаритных отливок в песчаные формы.

Сплав АЛ33 характеризуется высокой жаропрочностью, хорошей обрабатываемостью резанием, однако имеет пониженные литейные свойства и коррозионную стойкость. Он термически упрочняется. Температура работы сплава АЛ33 — до 350 °С.

Сплавы АЛ3 и АЛ5 отличаются повышенной жаропрочностью при тем­пературах до 250—270°С, но пониженной коррозионной стойкостью. Спла­вы упрочняют ТО, из них изготавливают корпуса приборов, головки цилиндров двигателей, работающие при повышенных температурах (250—270 °С).

**Коррозионностойкие литейные алюминиевые сплавы.** Сплавы систем А1—Mg (АЛ8, АЛ27) и А1—Mg—Zn (АЛ24) обладают высо­кой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах, обрабатыва­ются резанием и свариваются. Дополнительное легирование сплавов систе­мы А1—Mg бериллием, титаном и цирконием вызывает измельчение зерна и затормаживание процесса естественного старения, приводящего к снижению пластичности и коррозионной стойкости. Поэтому сплавы системы А1—Mg упрочняются только закалкой в масле без последующего старения (АЛ27).

Сплавы АЛ8, АЛ27 и АЛ27-1 характеризуются невысокими литейными свойствами и низкой жаропрочностью (рабочие температуры до 80 °С). Сплавы способны работать в условиях коррозии морской воды вместо дефицитных бронз, латуней и нержавеющих сталей.

Сплавы системы А1—Mg—Zn (АЛ24) обладают стабильными механиче­скими свойствами, хорошей жаропрочностью (до 150 °С) и удовлетвори­тельными литейными свойствами. Сплав АЛ24 упрочняется естественным или искусственным старением без предшествующей закалки либо за­калкой с 550 °С (на воздухе или в кипящей воде) с последующим искусст­венным старением (165 °С, 22 ч) для повышения прочности.

СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА И МАГНИЯ

Важнейшее преимущество титана и титановых сплавов перед другими конструкционными материалами – это высокая удельная прочность и жаропрочность в сочетании с хорошей коррозионной стойкостью, практическое отсутствие хладноломкости наряду с высокой удельной прочностью. Кроме того, титан и его сплавы, несмотря на плохую обрабатываемость резанием, хорошо свариваются, обрабатываются давлением в холодном и горячем состоянии, термически упрочняются, что имеет важное значение для их применения в ряде отраслей техники. Это относится в первую очередь к авиа-, ракето- и судостроению, химическому, пищевому и транспортному машиностроению.

*Титан* – металл серебристо-белого цвета с плотностью ρ = 4,505 г/см3 и температурой плавления 1672 °С. Титан может находиться в двух полиморфических модификациях: Tiα до 882 ºС с гексагональной плотноупакованной решеткой и высокотемпературной Tiβ выше этой температуры с объёмноцентрированной кубической решеткой до температуры плавления. Имеет высокие механические свойства σВ = 300 МПа, δ = 40 %, не имеет температурного порога хладноломкости, парамагнитен. Титан легкий, прочный, тугоплавкий, коррозионностойкий за счет возникновения оксидной пленки TiO2.

Механические свойства титана определяются составом: чем в нем меньше примесей, тем ниже прочность и выше пластичность (рис. 15.1). Характерная особенность титана – необычайно высокая чувствительность к примесям атмосферных газов: кислороду, азоту, водороду и углероду, которые образуют с титаном твердые растворы внедрения и промежуточные фазы: оксиды, нитриды, гидриды, карбиды, повышая его характеристики прочности и снижая пластичность.

Кроме того, ухудшается обработка давлением, свариваемость и коррозионная стойкость. Поэтому содержание этих примесей ограничивается сотыми и тысячными долями процента.

Полиморфизм титана, хорошая сплавляемость с другими металлами дает широкие возможности получения сплавов на основе титана с самыми разными механическими свойствами благодаря легированию, термической обработке, деформационному упрочнению.

Элементы, легирующие титан, подразделяются на:

* повышающие температуру полиморфного превращения и расширяющие область существования α-модификации: Al, Ga, La, C, O, N;
* понижающие температуру полиморфного превращения и расширяющие область существования β-модификации: Mo, V, Nb, Ta, Hf, W, Cr, Mn, Fe, Co и другие.

*Алюминий* является основным легирующим элементом для титана и содержится почти во всех промышленных сплавах. Он повышает удельную прочность сплава, жаропрочность, модуль упругости, уменьшает склонность к водородной хрупкости. Из-за уменьшения технологической пластичности содержание Al ограничивается 7 %.

Для повышения рабочих характеристик жаропрочных сплавов с высоким содержанием алюминия главным образом используют добавки *ванадия, молибдена и вольфрама.*

*Цирконий* повышает термическую стабильность, увеличивает предел ползучести, прочность при низких и средних температурах, уменьшает склонность к хладноломкости и улучшает свариваемость.

*Хром* считается одной из наиболее перспективных легирующих добавок к титану наряду с молибденом. Сплавы титана с хромом отличаются превосходным сочетанием прочности и пластичности (рис. 15.2).

*Ниобий* повышает стабильность поверхности, увеличивает жаростойкость при высоких температурах.

В связи с определенным характером действия на титан различных легирующих элементов промышленные сплавы по типу структуры могут быть подразделены на три группы: титановые сплавы на основе   
Tiα, сплавы на основе Tiβ и двухфазные (α+β)-титановые сплавы.

Промышленные титановые сплавы с (α+β)-структурой целесообразно подразделить на три группы: псевдо-α-сплавы с небольшим количеством β-фазы (Tiβ) со свойствами, близкими к α-сплавам (Tiα), типичные (α+β)-сплавы и псевдо-β-сплавы. Псевдо-β-сплавы представляют собой сплавы на основе Tiβ. В отожженном состоянии их физико-механические и технологические свойства типичны для β-сплавов, однако β-фаза у этих сплавов термически нестабильна.

По уровню характеристик прочности титановые сплавы классифицируют на *высокопластичные* и *малопрочные*, *среднепрочные* и *высокопрочные*, *жаропрочные*, *коррозионностойкие*.

По способности упрочняться с помощью термической обработки – на *упрочняемые* и *не упрочняемые*. По технологии производства – *на деформируемые* и *литейные*.

*Литейные титановые сплавы* (ВТЛ1, ВТ14Л, ВТ5Л и др.) имеют небольшой температурный интервал кристаллизации, высокую жидкотекучесть и хорошую плотность отливки. Титановые сплавы этой категории склонны к поглощению газов, поэтому разливку надо проводить в вакууме или в среде нейтральных газов. Для получения отливок используют чугунные или стальные формы, а также оболочковые и керамические формы.

Для фасонного литья применяют сплавы, близкие по химическому составу некоторым деформируемым сплавам (ВТ5Л, ВТ14Л), а также специальные литейные сплавы.

Титановые сплавы подвергаются следующим видам термической обработки: отжигу для снятия напряжений, рекристаллизационному отжигу, упрочняющей термической и химико-термической обработке.

Упрочняющая термическая обработка (α+β)-сплавов состоит из закалки с температур нагрева до β- или (α+β)-области с последующим искусственным старением. После закалки образуется α’-фаза (мартенситная фаза) игольчатого строения, представляющая собой пересыщенный твердый раствор легирующих элементов в α-фазе. При старении из α’-фазы выделяется β-фаза, понижающая твердость сплава, или интерметаллидная фаза, вызывающая охрупчивание.

При закалке из β-области структура сплавов состоит из переохлажденного β’-твердого раствора. При старении из такого раствора выделяется мелкодисперсная α-фаза, повышающая прочность и твердость сплава.

Для повышения жаростойкости детали из титановых сплавов подвергают различным видам диффузионной металлизации, а для повышения износостойкости – азотированию.

Магний – металл светло-серого цвета, обладающий наименьшим удельным весом среди металлов – 1,74 г/см3. Имеет гексагональную кристаллическую решетку. Температура плавления – 651°С. Несмотря на образование на поверхности тонкой пленки окиси магния (МgО), металл легко окисляется во влажной атмосфере, быстро разрушается под действием морской воды и большинства минеральных кислот, при повышении температуры интенсивно окисляется и может самовоспламеняться.

Механические свойства магния невысоки: он обладает небольшой прочностью и малой пластичностью: σВ = 190 МПа, σ0,2 = 90 МПа, δ = 18 %. Такие свойства магния ограничивают его применение как конструкционного материала. Технический магний выпускается трех марок: МГ90   
(99,9 % Мg), МГ95 (99,95 % Мg), МГ96 (99,96 % Мg). Используется технический магний как пиротехнический материал, в химических производствах, как раскислитель и модификатор в металлургии и для получения сплавов на его основе.

Основными легирующими элементами в магниевых сплавах являются марганец, алюминий и цинк. Алюминий и цинк оказывают большое влияние на прочность и пластичность магниевых сплавов: максимальные значения механических характеристик достигаются при введении в сплав   
6–7 % алюминия или 4–6 % цинка. Эти элементы образуют с магнием упрочняющие фазы Мg4Аl3 и МgZn2, выделяющиеся в мелкодисперсном виде после закалки со старением. Цирконий, титан, кальций, церий, лантан измельчают зерно, раскисляют сплав, повышают его жаропрочность.

Магниевые сплавы хорошо обрабатываются резанием и свариваются различными видами сварки, удовлетворительно работают при низких температурах. Для повышения механических свойств сплавы на основе магния могут подвергаются различным видам термической обработки:

* диффузионному отжигу при температуре 400–490 °С в течение 10–24 часов для устранения ликвации в литых сплавах (выравнивания химического состава по объему зерен);
* рекристаллизационному отжигу при температуре 250–350 °С для снятия наклепа; при этом отжиге уменьшается анизотропия механических свойств, возникшая при пластической деформации;
* закалке со старением при температуре 150–200 °С;
* гомогенизации (закалке) при 380–540 °С.

По технологии изготовления изделий магниевые сплавы разделяются на *литейные* МЛ и *деформируемые* МА.

В литых магниевых сплавах повышения механических свойств добиваются измельчением зерна модифицированием добавками мела или магнезита. При литье в песчаные формы в смесь вводят специальные добавки (фториды алюминия) для уменьшения окисления магния.

Среди *литейных* магниевых сплавов широкое применение имеют сплавы МЛ5, МЛ6, МЛ10, МЛ12 и др. Химический состав и свойства приведены в таблице 16.2.

Сплавы системы «Mg – Al – Zn» (МЛ4, МЛ5, МЛ6) – отличаются наилучшими литейными свойствами: малой линейной усадкой, хорошей жидкотекучестью, малой склонностью к образованию рыхлот. Из этих сплавов изготавливают сложные ответственные отливки. Структура этих сплавов состоит из δ-твердого раствора алюминия и цинка в магнии с включениями по границам зерен соединения Мg17Al12 (в виде мелких частиц голубоватого цвета). После литья сплавы подвергают гомогенизационному отжигу.

*Жаропрочные* магниевые сплавы (МЛ9 – МЛ11, МЛ14, ВМЛ–1 и ВМЛ–2) разработаны на основе системы «Мg – Zn – Zr» и используются для длительной эксплуатации при температурах 250–350 °С и кратковременной – до 400 °С. Жаропрочные свойства определяются присутствием интерметаллидных фаз. Эти сплавы упрочняются с помощью закалки и старения. Температура закалки от 540–545 °С, охлаждение в воде при температуре 80 °С, старение при 205 °С.

Жаропрочные магниевые сплавы часто применяются для деталей, подвергающихся одновременному воздействию статических и усталостных нагрузок.

Коррозионная стойкость магниевых жаропрочных сплавов зависит от их состава, структуры и содержания примесей. Эти сплавы обладают хорошими технологическими литейными свойствами, высокой герметичностью (до 450 атм.), способностью сохранять высокую стабильность размеров. Отличаются малой склонностью к образованию микрорыхлот, горячих трещин в отливках.

Дополнительное легирование сплавов на основе «Мg – Zn – Zr» редкоземельными элементами, например в сплавах: МЛ12, МЛ15, МЛ18, уменьшает склонность к трещинообразованию, чувствительность к толщине сечения литой детали и повышает прочностные характеристики.

ЛЕГКОПЛАВКИЕ ПОДШИПНИКОВЫЕ СПЛАВЫ С МЯГКОЙ МАТРИЦЕЙ (БАББИТЫ)

При применении мягких легкоплавких подшипниковых сплавов обеспечивается меньший износ шейки вала. Они имеют и минимальный коэффициент трения со сталью и хорошо удерживают смазку.

В качестве таких материалов используют: а) сплавы системы Sn - Sb (+ Cu) - оловянные баббиты; б) сплавы системы Pb - Sn - Sb (+ Cu и другие элементы) - свинцово-оловянные баббиты; в) сплавы системы Pb - Sb (+ Cu) - свинцовые баббиты и системы Pb - Ca - свинцово-кальциевые баббиты; г) сплавы системы Zn - Cu - Al - цинковые антифрикционные материалы (иногда называемые цинковыми баббитами); д) сплавы системы Al - Sn (+ Cu) - алюминиевые подшипниковые сплавы(иногда называемые алюминиевыми баббитами).

В оловянных баббитах (Б 88, Б 83), мягкой основой является α -твердый раствор на основе олова, а твердыми частицами - β‘-фаза - твердый раствор на базе интерметаллидного соединения SnSb , а вследствие ввода 2,5-6,5% Cu для предотвращения сильной ликвации - и частицы Cu3Sn, образующие “каркас” еще до начала кристаллизации других фаз. Оловянные (или, как их часто называют, оловянносурьмяномедные) баббиты обладают наилучшими свойствами и имеют максимальные значения рабочих параметров, определяющих допустимый режим работы.

Оловянные баббиты содержат 7-12 % сурьмы, 2,5-6,5 % меди, иногда - до 1% кадмия (основа -олово), являются дорогими материалами (см. табл. 1.4) и применяются для подшипников ответственного назначения (в дизелях, паровых турбинах и т.д.), работающих при больших скоростях и нагрузках.

В оловянно-свинцовых баббитах (Б 6, БТ, БН, Б 16) содержится 5-17% олова, 13-17% сурьмы, 1-3% меди, а также, в зависимости от марки - в небольших количествах такие элементы, как Cd, Te, As, Ni. Основой сплава является свинец. В качестве мягкой основы здесь выступает твердый раствор на базе свинца, а твердыми включениями - преимущественно частицы SnSb. Как и в оловянных баббитах, добавка меди уменьшает ликвацию по плотности и обеспечивает появление частиц дополнительной упрочняющей фазы - Cu3Sn. Оловянно-свинцовые баббиты значительно дешевле оловянных, а по качеству уступают им ненамного (особенно баббит Б 16). Присадки других элементов обеспечивают различные эффекты: As увеличивает жидкотекучесть и износоустойчивость, Ni повышает твердость, что снижает износ, Te упрочняет сплав.

В свинцовых баббитах (баббит БС) при содержании 16-18% сурьмы являющихся заэвтектическими, мягкой основой является эвтектика Pb - Sb (13% Sb + 87% Pb), имеющая твердость НВ 7-8, а твердыми включениями - кристаллы сурьмы с твердостью НВ30. Такой баббит имеет меньшие прочность и пластичность и более высокий коэффициент трения в сравнении с предыдущими сплавами и поэтому применяется в менее нагруженных подшипниках.

Свинцово-кальциевые баббиты (БК, БКА, БК 2), как и баббит БС, являются более дешевыми в сравнении со сплавами, содержащими олово, хотя по ряду показателей и уступают им. В этих сплавах мягкой основой является свинец, а твердыми частицами - соединения свинца с кальцием и натрием. Такие баббиты используют в железнодорожном транспорте.

Цинковые подшипниковые сплавы (ЦАМ 10-5, ЦАМ 5-10) являются более дешевыми материалами в сравнении с баббитами, имеющими в своем составе свинец и особенно олово. В качестве мягкой основы в них выступает эвтектика Zn+Al, в состав которой в связи с присутствием меди входит и третья составляющая - CuZn3, а в роли твердых частиц выступают частицы CuZn3. Цинковые сплавы уступают оловянным баббитам по пластичности, коэффициенту трения и коэффициенту линейного расширения и примерно равноценны свинцовым баббитам. Цинковые антифрикционные сплавы применяют для изготовления вкладышей, втулок, ползунов, биметаллических деталей.

В качестве подшипниковых сплавов, заменяющих в ряде случаев оловянные и свинцовые баббиты, нашли применение сплавы на основе алюминия (системы Al - Sb, Al - Sb - Pb, Al - Ni, Al - Cu - Si), мягкой основой которых является твердый раствор на основе алюминия, а твердыми включениями - соединения алюминия с легирующими элементами.

Алюминиевые сплавы обладают низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью, низкой плотностью. Однако, они уступают другим подшипниковым сплавам по технологичности (повышенная твердость требует повышенной чистоты обработки цапф и вкладыша и высокой твердости шейки вала, ибо несоблюдение этих условий приводит к ускоренному износу), коэффициенту линейного расширения (его повышенные значения требуют более тщательной сборки с большим зазором).