

ЛЕКЦИЯ-17

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Термическое упрочнение поверхностей трения. Различают три основных вида термической обработки: отжиг, закалку и улучшение.

Отжиг. Диффузионный отжиг преследует цель путем долговременно-го нагрева выровнять неоднородности химического состава сплава, особенно ликвационного характера. Нагрев ведут, как правило, до высоких температур (от 1100 до 1300 С) в области γ -твердого раствора. Посредством диффузионного отжига в первую очередь достигают выравнивания различия в содержании легирующих элементов, обусловленного внутрикристаллитной ликвацией.

Отжиг с фазовой перекристаллизацией (нормализация) преследует цель путем двукратного γ - α превращения создать мелкозернистую структуру, отличную от исходной. В фасонном литье устраняется грубозернистая литая структура, обуславливающая низкие механические свойства. В катаных и кованных заготовках устраняются различия в структуре, обусловленные различиями в условиях деформирования и неравномерностью охлаждения. Структура после перекристаллизации имеет тем более мелкое зерно, чем быстрее проводятся нагрев и охлаждение, чем ближе температура нагрева к точке A_{C3} и чем меньше выдержка при этой температуре.

Отжиг для снятия напряжений, возникающих при сварке и холодном деформировании, осуществляют в интервале температур 450–650 С, но не выше температуры отпуска при предшествовавшем улучшении. После отжига целесообразно проводить медленное охлаждение, чтобы свести к минимуму новые напряжения.

Закалка. Закалка представляет собой процесс охлаждения заготовки из температурной области твердого раствора с такой скоростью, что превращение в перлитной и промежуточной областях оказывается подавленным и образуется мартенсит. Сталь переходит в состояние наибольшей возможной твердости. Различают: нормальную закалку, применяемую при обработке средне- и высокоуглеродистых сталей, и закалку после химико-термической обработки (цементации высокотемпературного цианирования) применяемую для сталей с относительно низким содержанием углерода (см. раздел «Цементация»).

При закалке возникают значительные напряжения макроскопические, микроскопические и субмикроскопические (1-го, 2-го и 3-го рода), обусловленные неравномерностью пластических деформаций при охлаждении или нагревании заготовки (деформационные напряжения); изменениями объема, возникающими при превращении (фазовые напряжения); искажением атомной решетки при мартенситных (или подобных) превращениях (структурные напряжения). Напряжения разного рода находятся в

сложном соотношении, которое в конечном итоге обуславливает сопротивляемость усталости и изнашиванию. Следствием напряженного состояния могут быть закалочные трещины и коробление заготовок.

В ряде случаев целесообразно упрочнять только поверхностные слои. Тогда нагревают до закалочной температуры только этот поверхностный слой, а сердцевина остается незакаленной. Наиболее распространенными методами поверхностной закалки являются газопламенный и особенно электроиндукционный (ТВЧ). Регулируя скорость движения индуктора, подводимую тепловую энергию и скорость охлаждения, изменяют глубину и качество закаленного слоя. Поскольку расходуется энергия лишь на нагрев тонких слоев заготовки, поверхностная закалка экономичнее объемной.

Отвечает современным требованиям метод плазменной закалки. Внедрена установка для поверхностной закалки крупномодульных зубчатых колес производительности 75 п.м/ч (диаметр колеса до 1600 мм, модуль 9...22). Обработка ведется с помощью двух плазмотронов (источник питания типа ВПР-602), которые перемещаются вдоль зуба колеса (скорость нагрева 500...600 С/с). В качестве теплоносителя используется низкотемпературная плазма. Охлаждение осуществляется водой, которая подается через спрейер, движущийся вслед за плазмотронами. Защита инертным газом исключает окисление и обезуглероживание поверхности.

Для придания структурам закалки большей пластичности, снятия остаточных напряжений заготовки подвергают операциям отпуска.

Отпуск заключается в повторном нагреве стали до температуры, лежащей между комнатной и точкой A_{C1} . Во время отпуска идут структурные изменения, которые вследствие недостатка времени не смогли произойти при этой же температуре в процессе охлаждения при операции закалки. Иногда требуется многократный отпуск.

Улучшение. Закалку с высоким отпуском называют улучшением. Основное назначение улучшения – создание дисперсной структуры. В случае малоуглеродистых сталей сама загадка действует как улучшение, так как даже без высокого отпуска сталь получает высокую вязкость при повышенной прочности. Обычно температура отпуска при улучшении определяется требуемым уровнем и сочетанием свойств твердости, прочности и вязкости и зависит от содержания углерода в стали. В случае среднеуглеродистых сталей (например, применяемых при азотировании) улучшение назначают для получения соответствующих свойств (вязкости) сердцевины. Нередко улучшение применяют как для получения достаточных прочностных (вязкостных) свойств, так и для повышения обрабатываемости стали.

Химико-термическая обработка применяется для улучшения антифрикционных свойств металлов и повышения их износостойкости путем диффузионного насыщения или модифицирования их соединениями химически активных элементов.

Химико-термическая обработка, производимая в твердых, жидких и газовых средах, делится на две основные группы:

1) химико-термические виды обработки, применяемые для увеличения износостойкости повышением поверхностной твердости деталей (цементация, азотирование, цианирование, борирование);

2) химико-термические виды обработки, предназначенные в основном для улучшения противозадирных свойств металлов путем создания тонких поверхностных слоев металлов, обогащенных химическими соединениями с активными элементами, которые предотвращают схватывание и задиры при трении (сульфидирование, сульфацианирование, селенирование, теллурирование, обработка в йодисто-кадмиевой соляной ванне). Действие этих видов обработки заключается в снижении коэффициента трения и локализации начинающегося задира (при этом твердость поверхности почти не меняется).

Цементацию применяют для низкоуглеродистой нелегированной и легированной стали с содержанием (0,08...0,30)% углерода. Концентрация углерода в поверхностном слое толщиной (0,15...2,0) мм после цементации обычно (0,8...1,0)% Поверхностная твердость после цементации с последующим низким отпуском составляет HRC 58-64.

После цементации и закалки детали из легированной стали рекомендуется подвергать поверхностному наклепу, в результате чего остаточный аустенит превращается в мартенсит. После термообработки цементованный слой имеет структуру игольчатого мартенсита с мелкими глобулами карбидов и небольшим количеством остаточного мартенсита, для которой характерна высокая износостойкость.

Азотирование обогащает нитридами поверхностный слой на глубину (0,25...0,7) мм, что повышает износостойкость, сопротивляемость эрозии и кавитации. Азотируют обычно ответственные детали из низколегированных и легированных сталей (детали турбин, штоки клапанов, гильзы цилиндров ДВС, втулки, пальцы, валики, зубчатые колеса, клапаны, шатуны, болты, плунжеры, втулки и др.).

Нитроцементация и цианирование. Эти процессы по сравнению с газовой цементацией имеют преимущество в скорости насыщения. Поверхностный слой получается более износостойким, чем при газовой цементации, благодаря наличию азота и мелкозернистой структуре. Структура поверхностных слоев после цианирования отличается наличием карбонитридной зоны. Нитроцементация осуществляется в газовой среде, глубина закаленного слоя (0,15...1,0) мм, твердость после закалки HRC 52–60.

Цианирование проводят в расплавах солей, глубина цианированного слоя (0,1...1,6) мм.

Борирование, применяемое преимущественно для среднеуглеродистых нелегированных сталей, проводят в твердой, жидкой или газообразной среде. Поверхностная твердость стали после борирования достигает *HV*

1400...1500, что обеспечивает высокую износостойкость. Глубина борированного слоя (0,12...0,85) мм.

Сульфидирование и сульфоцианирование. Сульфидирование, обычно проводимое в солевых ваннах, дает значительный противозадирный эффект и снижает коэффициент трения. Износостойкость повышается в (2...5) раз.

При сульфоцианировании (одновременном насыщении поверхностей нитридами и сульфидами) достигается повышение как противозадирных свойств поверхностей, так и их износостойкости.

Нанесение износостойких покрытий

Для повышения износостойкости изделий применяют гальванические покрытия – хромирование, осталивание, никелирование.

Хромирование. Хромовое покрытие, наносимое на поверхность деталей гальваническим способом толщиной (0,1...0,2) мм, имеет высокую твердость (НВ 1000...1100), низкий коэффициент трения, что значительно снижает тепловыделение при трении. Износостойкость твердого гладкого хромового покрытия в (5...15) раз выше, чем стальных деталей.

Хромирование бывает двух видов: твердое гладкое и пористое. Твердое гладкое хромовое покрытие имеет один существенный недостаток: оно плохо смачивается смазочными маслами. Для увеличения смачиваемости покрытия прибегают к созданию в нем пор, углублений и каналов (пористое хромирование) путем анодного травления твердого гладкого хромового покрытия. Пористость покрытия может быть канальчатой (сечение каналов 0,05 0,05 мм) или точечной.

Точечная пористость обладает большей маслостойкостью, поэтому ее применяют для упрочнения деталей, работающих в особо тяжелых условиях (например, для верхних компрессионных колец двигателей). Она характеризуется быстрой прирабатываемостью, но ее износостойкость несколько ниже, чем у хромового покрытия с канальчатой пористостью. Канальчатым хромом часто покрывают гильзы цилиндров. Износ пористохромированных гильз и поршневых колец меньше нехромированных в (4...7) раз, причем износ сопряженных стальных деталей также уменьшается в (3...5) раз.

Хромирование деталей может проводиться с припуском под последующую механическую обработку (шлифовку и притирку) либо без припуска «в размер».

Хромированные детали хорошо работают в паре с баббитами, мелкозернистым чугуном или с деталями из мягких и среднезакаленных сталей при наличии смазки и не слишком высоком давлении. Не рекомендуется хромировать детали, работающие в паре с титановыми сплавами.

Хромирование не заменяет закалку и цементацию. Более того, для повышения износостойкости закаленных и цементованных сталей их также хромируют.

Хромирование применяют также для восстановления изношенных деталей.

Осталивание, широко используемое для восстановления изношенных поверхностей стальных и чугунных деталей, в отличие от хромирования более производительное (примерно в 10...15 раз), недорогое, толщина покрытия достигает 3 мм; твердость гальванически осталенной поверхности HV 6000...6500. Осталивание может применяться также для создания подслоя перед хромированием.

Износостойкое никелирование. Это покрытие имеет меньшую твердость, чем хромовое, однако оно хорошо обрабатывается и имеет большую вязкость при толщине слоя до 2 мм. Кроме того, никелирование – менее дорогой и более производительный процесс, чем хромирование. Хорошими антифрикционными свойствами обладают электролитические покрытия из твердого фосфористо-никелевого сплава. Коэффициент трения подобного покрытия по чугуну на 30% ниже коэффициента трения стали по хрому. При сухом трении износостойкость такого покрытия в 2,5– 3 раза выше, чем у закаленной, стали. Износ сопряженных деталей при работе по фосфористо-никелевому покрытию в (4...5) раз меньше, чем при работе по стали, и на (20...40)% меньше, чем при работе по хрому.

Твердым никелированием упрочняют и восстанавливают такие детали, как шпиндели металлорежущих станков, поршневые пальцы, коленчатые валы, гильзы цилиндров и др.

Оксидирование – процесс получения оксидных пленок толщиной более 60 мкм с высокой микротвердостью (4000...4500 МПа) и износостойкостью – используется для повышения износостойкости зубчатых колес, деталей двигателей, текстильных машин и других деталей из алюминия и его сплавов. Износостойкость некоторых деталей после оксидирования при работе со смазкой возрастает в 5 и более раз.

Покрывание дисульфидом молибдена и графитирование

Дисульфид молибдена наносят на трущиеся детали непосредственно в виде порошка, втираемого в поверхность, или вводят в состав пленкообразующего материала, наносимого на поверхность. Покрытие с толщиной пленки 8-12 мкм непригодно для нанесения на дорожки качения подшипников и их в основном наносят на сепараторы подшипников больших размеров.

Покрывания, полученные втиранием порошка, имеют толщину около 1 мкм и в связи с этим небольшой срок службы. В подшипниках качения такие покрытия применяют при условии использования самосмазывающихся материалов для сепаратора; покрытия наносят на дорожки качения, а иногда и на тела качения.

Это обеспечивает надежную работу подшипника в начальный период эксплуатации.

Порошок дисульфида молибдена наносят на детали подшипников качения в галтовочных барабанах. А.П. Бабищев и Ю.И. Андрищенко разра-

ботали вибрационный метод нанесения покрытия. Порошок дисульфида молибдена под действием вибрации наносится на обрабатываемые детали.

Покрытие производится в установках, имеющих камеры соответствующего объема при амплитуде колебания 1,5 мм и частоте 40 Гц; источником вибрации служит вращающийся несбалансированный вал. Для получения покрытия большей толщины и лучшего сцепления его с поверхностью деталей последние подвергают легкому травлению для образования шероховатой поверхности.

Испытания образцов на контактную усталость с покрытиями, нанесенными вибрационным методом, показали его преимущества.

Покрытие дисульфидом молибдена применяют для уменьшения фреттинг-коррозии деталей. Этот способ дает хорошие результаты, например, в болтовых соединениях. Прочность соединений (число циклов до разрушения) может увеличиваться вдвое.

Графитовый порошок не пригоден как добавка к смазочным маслам – он быстро осаждается в масле, закупоривает смазочные отверстия и маслопроводы. Стойкую суспензию в маслах и в воде дает коллоидный графит, получаемый путем размола слоистого графита до частиц размером около 1 мкм. Коллоидный графит, смешанный с минеральными маслами, используют в текстильной, стекольной и некоторых других отраслях промышленности.

Коллоидный графит ускоряет приработку поверхностей трения. Улучшается также качество поверхностей. Кроме того, коллоидный графит увеличивает скорость смачивания смазочным маслом в (3...8) раз даже поверхностей с полированным хромом. Графит быстро покрывает обнажающиеся в процессе приработки участки поверхностей трения, образуя слой твердого смазочного материала, что предупреждает непосредственный контакт металлов, наступающий обычно в первые минуты работы пары трения, когда и происходит повреждение поверхности. Коллоидный графит для приработки используется главным образом для пары трения цилиндр-поршень двигателя внутреннего сгорания. Для этого производят графитирование наружной поверхности поршней, за исключением кольцевых канавок. Толщина слоя графита (0,03...0,08) мм. Пленка просушенного графитового покрытия не должна терять прочность, размягчаться или отслаиваться.

Наплавка и напыление поверхностей

Наплавка применяется как для упрочнения поверхностей изготавливаемых деталей, так и для восстановления и увеличения срока службы изношенных деталей машин. При наплавке происходит сплавление нанесенного слоя с основным металлом, что обеспечивает их хорошее сцепление. Наплавлять можно слои любой толщины, производительность процесса высокая. Существует несколько видов наплавки.

Газовая наплавка используется для упрочнения деталей, изготовленных из сталей 35, 40 и 45, а также из низко- и среднелегированных

сталей. Наиболее широко применяют газовую наплавку твердыми сплавами типа сормайт инструмента и деталей, рабочие поверхности которых должны иметь большую твердость и высокую износостойкость (детали дорожных, строительные, сельскохозяйственных машин и др.). Толщина наплавленного слоя в зависимости от условий работы деталей (0,25...5,0) мм.

Электродуговая наплавка используется при восстановлении изношенных деталей. Она производится электродами различных марок в средах защитных газов, под слоем флюса другими методами, позволяющими получать высокое качество наплавленного слоя. Электродуговая наплавка бывает ручная, полуавтоматическая и автоматическая.

Кроме газовой и электродуговой наплавки применяют и другие способы наплавки – электрошлаковую, вибродуговую и др. Износостойкие покрытия наносят также газовой, электрической плазменной металлизацией. Особенно перспективна получившая развитие в последние годы плазменная металлизация.

Толщина наплаваемого слоя зависит от условий работы пары трения и определяется: для трения скольжения – припуском на износ; для трения качения (со скольжением) – отсутствием напряжений между сердцевиной и упрочненным слоем; для переменных температур – минимумом температурных колебаний на границе сердцевины и слоя. В иных случаях толщина задается по конструктивным соображениям. Наряду с заметными преимуществами наплавка имеет и недостатки, которые в основном сводятся к недостаточной прочности сцепления слоя с основой, возможности образованию дефектов металлургического характера (шлаковых включений, непроваров, трещин). Поэтому назначать наплавку для поверхностей высокой контактной нагруженности нужно весьма осторожно.

Высокой износостойкостью в условиях циклической термической нагрузки и интенсивного абразивного изнашивания отличаются наплавленные под флюсом спеченные в виде электронной ленты материалы сложного состава: ЛС-5Х4В2М2ФС, ЛС-70Х3МН. Внедрена наплавка методом «намораживания» клапанов двигателей. Новый способ основан на совмещении во времени индукционного нагрева и плавления присадочного материала с последующим интенсивным водяным охлаждением клапанов двигателей. Создание присадочных колец из никелехромовых сплавов в (5...7) раз удешевило наплавку и дало возможность отказаться от дефицитных кобальтовых стелитов. Долговечность наплавленных клапанов увеличилась в (2...7) раз, производительность в 13 раз, а количество брака уменьшилось в (7...10) раз.

Биметаллические поверхности (изделия) литьем получают методом заливки жидкого металла на твердую основу. Метод обеспечивает надежную свариваемость соединяемых частей отливки; высокую твердость и износостойкость рабочих поверхностей при прочной и вязкой сердцевине; восстанавливаемость жидким металлом изношенных поверхностей взамен процессов электродуговой и электрошлаковой наплавки. Метод исключает

энергоёмкие металлургические процессы производства наплавочных материалов – проволоки, порошковой ленты, литых электродов. Процесс позволяет увеличить производительность восстановления деталей в (5...10) раз и позволяет восстанавливать геометрию рабочих поверхностей в пределах допусков на литые изделия. Ресурс биметаллических литых изделий повышается в (2...3,5) раза.

Напыление. Высокими триботехнологическими возможностями обладает металлизация напылением, заключающаяся в расплавлении подвдимого к металлизатору металла и распылении его струей сжатого газа (воздуха) в направлении заранее подготовленной поверхности детали. Напыляют различные металлы и порошки (твердые сплавы). В зависимости от источника тепла различают газовое, электрическое и плазменное напыление. Напыленный слой благодаря своей пористости обладает высокими антифрикционными свойствами при хорошей смазке и скорости скольжения не выше 3,5 м/с. Покрытия неспособны работать при сухом трении и снижают предел выносливости. Напылению подвергают поверхности опор скольжения, валов (в обратных парах трения), направляющих.

Одним из перспективных методов упрочнения поверхностей трения является метод электроискрового легирования, позволяющий получать достаточно прочно связанные с упрочняемой поверхностью и значительные по толщине износостойкие покрытия с удельным временем легирования 3 мин/см². Шероховатость полученных слоев не хуже $Ra = 2,5$ мкм, толщина упрочненного слоя (50...60) мкм, сплошность (80...90)%, микротвердость (10000...12000) МН/м². Стойкость упрочненных вырубных штампов увеличилась в (1,5...2,0) раза по сравнению со стойкостью штампов, упрочненных стандартным твердым сплавом Т30К4.

По технологическим возможностям зарекомендовал себя метод плазменного напыления. При этом способе расплавление и распыление тугоплавких материалов (окись алюминия, вольфрам, ниобий, молибден, карбиды, бориды и т. д.) осуществляется с помощью высокотемпературной плазменной струи. В соответствии со свойствами покрытий обеспечиваются требуемая жаропрочность, сопротивление окислению, износостойкость при высоких температурах и в различных средах. Плазменное напыление имеет ряд преимуществ: высокие температуры позволяют распыливать и наносить различные материалы высокой температуры плавления; поток плазмы, не содержащий кислорода, не допускает окисления обрабатываемой поверхности и покрытия; возможно нанесение многослойных покрытий; высокая скорость потока газа позволяет увеличить плотность покрытия до 90 % и достичь прочного сцепления с основой; в связи с нагревом поверхности заготовки не выше 200 С исключается коробление деталей; энергетические характеристики потока плазмы легко регулируются в зависимости от требований ТП. Наиболее часто плазменное напыление используют для нанесения тугоплавких соединений или противостоящих высокотемпературной коррозии (например, на поверхности лопаток газовых турбин).