

## КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ

**Д.В.Колмыков**, доцент, Курская государственная сельскохозяйственная академия  
**А.Н.Гончаров**, доцент, Курская государственная сельскохозяйственная академия

*Приведен обзор существующих методов комбинированной упрочняющей обработки стальных деталей машин, рассмотрены основные методы комбинированной обработки конструкционных и инструментальных сталей*

В современных условиях, производство конкурентоспособной продукции машиностроения и её эффективная реновация невозможны без использования упрочняющих технологий, особенно таких, которые позволяют сформировать на поверхности изделий слои или покрытия, отличающиеся повышенными эксплуатационными характеристиками, в первую очередь повышенной износостойкостью. В арсенале методов упрочняющей обработки конструкционных и инструмен-

тальных материалов, разработанных к настоящему времени, имеются как традиционные технологии, так и принципиально новые электрофизические, электроннолучевые, лазерные, импульсные и другие технологии, позволяющие получить тонкие высокопрочные и износостойкие покрытия (слои) на самых различных материалах. Примерная классификация основных методов упрочняющей обработки металлических материалов представлена в таблице.

Таблица - Классификация методов упрочнения металлических материалов

Класс упрочняющей обработки	Методы	Технологические процессы
1 Упрочнение изменением структуры всего объёма изделия	1.1 Термическая обработка	Закалка (обычная, светлая, изотермическая, с самоотпуском, ступенчатая и др.) Отпуск высокий, средний, низкий)
	1.2 Криогенная	Закалка с обработкой холодом
2 Упрочнение изменением шероховатости поверхности	2.1 Обработка резанием	Шлифование, хонингование, полирование, суперфиниширование
	2.2 Электрохимическое полирование	Обработка в электролизных ваннах, обработка в проточном электролите
3 Упрочнение изменением химического состава поверхностного слоя металла	3.1 Диффузионное насыщение неметалла	Азотирование, цементация, нитроцементация, силицирование, сульфидирование, борирование, нитрооксидирование, сульфидирование и др.
	3.2 Диффузионная металлизация	Хромирование, титанирование, алитирование, никелирование и др.
	3.3 Диффузионное насыщение комплексом элементов	Карбохромирование, хромоазотирование, хромотитанирование, хромосилицирование, борохромирование, цирконосилицирование, бороцирконирование и др.
4 Упрочнение изменением структуры поверхностного слоя	4.1 Термическая обработка поверхности	Закалка токами высокой частоты, лазерная закалка, плазменная закалка
	4.2 Механическая обработка пластическим деформированием	Накатка, раскатка, дробеструйная обработка, чеканка, вибрационная обработка, обработка взрывом, термомеханическая обработка и др.
	4.3 Электрофизическая обработка	Электроимпульсная обработка, электроконтактная, обработка, электроэрозионная обработка, ультразвуковая обработка и др.
5 Упрочнение нанесением покрытий на поверхности	5.1 Наплавка легированным металлом	Газопламенная наплавка, электродуговая наплавка, плазменная наплавка, наплавка лазерным лучом, наплавка пучком ионов
	5.2 Напыление	Газотермическое напыление, плазменное напыление порошковых материалов, детонационное напыление, электродуговое напыление, лазерное напыление и др.
	5.3 Химическое осаждение	Оксидирование, фосфатирование, никелирование, осаждение из газовой фазы, нанесение смазочного материала
	5.4 Электрохимическое осаждение	Хромирование, никелирование, борирование, цинкование, меднение, железнение, осаждение электролитических сплавов на основе железа, хрома и др.
	5.5 Электрофизические методы	Электроискровое легирование, электроакустическое нанесение покрытий, лазерное легирование, легирование пучком ионов и др.
	5.6 Осаждение твёрдых покрытий из паровой фазы	Термическое испарение тугоплавких соединений, катодно-ионная бомбардировка, электронно-лучевое испарение, электрохимическое испарение
6 Упрочнение изменением энергетического запаса поверхностного слоя	6.1 Обработка в магнитном поле	Электромагнитная обработка, обработка в импульсном магнитном поле

Использование того или иного процесса упрочняющей обработки определяется требованиями, предъявляемыми к конкретным изделиям. В современных условиях, когда значительно увеличились нагрузки на детали машин ввиду повышения их мощности и производительности; известные методы уже не всегда обеспечивают требуемые свойства, поэтому возрастает интерес к использованию комбинированных методов упрочнения, представляющих собой сочетание двух или нескольких технологических процессов, что позволяет достичь очень высокой эффективности упрочнения, которую невозможно получить каким-либо одним методом.

Комбинированная обработка становится тем более актуальной, что в промышленности наметилась тенденция к сокращению использования легированных сталей из-за острой дефицитности и чрезвычайно высокой стоимости легирующих металлов.

При упрощении деталей массового производства, комбинированные методы должны соответствовать технологическим возможностям предприятий, поэтому должны сочетать широко распространённые и освоенные промышленностью технологии. Для упрочнения деталей из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей наибольший интерес представляют методы, сочетающие нанесение на рабочие поверхности высоколегированных покрытий с последующей упрочняющей обработкой.

Главным недостатком практически всех металлургических покрытий, наносимых различными методами (наплавкой, гальваническим осаждением, газотермическим напылением и др.) является наличие в них остаточных растягивающих напряжений, которые негативно сказываются на усталостной прочности, износостойкости и других свойствах. Кроме того, покрытия всех видов имеют в структуре несплошности (поры) и другие дефекты, которые заметно снижают их прочность.

Радикальным способом устранения указанных недостатков и обеспечения высоких эксплуатационных характеристик изделий с нанесёнными на их поверхности покрытиями может быть их химико-термическая обработка. насыщение металлургических покрытий элементами из внешней среды (главным образом азотом и углеродом) коренным образом изменяет химический и фазовый состав поверхностных слоёв, повышая твёрдость, создавая благоприятные внутренние напряжения, увеличивая прочность сцепления покрытий с основой и устраняя дефекты структуры.

В этом плане представляет интерес серия работ, выполненных в последние годы в Юго-Западном государственном университете, по упрочнению различных деталей комбинированными методами. Эти методы сочетают нанесение на рабочие поверхности деталей из углероди-

стых сталей легированных покрытий с последующей цементацией или нитроцементацией в активных насыщающих средах. При этом покрытия на крупногабаритные изделия наносятся наплавкой или газотермическим напылением, а на детали небольших размеров – гальваническим осаждением бинарных сплавов на основе железа, содержащих хром, молибден, вольфрам или титан. Изменяя систему и степень легирования материала покрытий и режимы насыщения их углеродом и азотом можно получить практически любые требуемые характеристики поверхностных слоёв.

Для деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, разработан способ получения на поверхности глубоких слоёв, содержащих большое количество карбидов цементитного типа. Это достигается наплавкой на упрочняемые поверхности покрытий с содержанием 1...1,5% Cr (например стандартной проволокой 30ХГСА) и их последующим науглероживанием до заэвтектоидных концентраций.

В результате на поверхности образуется большое количество цементита в виде изоморфных включений.

После закалки и низкотемпературного отпуска карбидосодержащий слой хорошо сопротивляется воздействию абразива из-за высокой твёрдости карбидных частиц (>10 000 МПа). И в то же время, имеет удовлетворительную ударную вязкость, так как включения карбидов имеют равноосную (округлую) форму и изолированы друг от друга участками относительно вязкой матрицы.

Абразивная износостойкость изделия после такой обработки определяется содержанием карбидов в диффузионном слое. При их содержании более 70% износостойкость в кварцевом абразиве возрастает на порядок и более.

Поверхностная карбидизация хромистых сталей производится при температурах 900...920°C в пастообразном карбюризаторе, состоящем из газовой мелкодисперсной сажи с активизирующими добавками углекислого натрия или бария. В качестве пастообразователя может быть использован любой органический клей (КМЦ, ПВА и др.) цементацию можно проводить в контейнерах (как при обычной твёрдой цементации) или в печах с герметичными ретортами (типа «Ц») с подачей в рабочее пространство углеродсодержащей жидкости или газа. Скорость насыщения стали составляет 0,15...0,20 мм/ч, глубина карбидосодержащих слоёв может достигнуть 1 мм и более. Аналогичный метод был разработан для повышения износостойкости деталей, работающих в сопряжениях с недостаточной смазкой или вовсе без таковой. Он состоит в создании на трущихся поверхностях графитосодержащих слоёв, при этом для обеспечения графитизации на поверхности деталей следует наносить по-

крытия, в составе которых должно содержаться повышенное количество кремния, поскольку он способствует образованию графита при науглероживании.

Цементация кремнистых покрытий производится в описанном выше карбюризаторе. Температура при этом должна быть повышена до 950...980°C, длительность обработки – 10...12 часов. В результате такой обработки на поверхности кремнистого покрытия получается графитосодержащий слой, глубиной до 1 мм.

Для получения большого содержания графита в структуре диффузионного слоя (до 20%) изделие можно подвергнуть дополнительному графитизирующему отжигу (900...920°C, 8...10 ч).

Графит, содержащийся в поверхностных слоях изделий играет роль твёрдой смазки в сопряжениях, снижает коэффициент трения (в 2...3 раза по сравнению со сталью) и не допускает схватывания контактирующих поверхностей.

Представленный выше процесс графитизации наплавленных покрытий довольно длительный и дорогой, так как требует использования высоких температур, поэтому могут возникнуть технологические и экономические трудности при его внедрении в производство. В связи с этим, была разработана технология ускоренной графитизации поверхностных слоёв стальных изделий посредством двухступенчатой (низко – и высокотемпературной) нитроцементации. Для проведения такой нитроцементации используется специальная паста на основе сажи, с содержанием 40% железосинеродистого калия (азотосодержащий компонент) и добавками углекислого натрия и калия.

Первая ступень нитроцементации проводится при относительно низких температурах (600...650°C), при которых поверхность металла насыщается большим количеством азота. Для проведения второй ступени нитроцементации (собственно графитизации) температура поднимается до 850°C. При этом происходит деазотирование поверхности с распадом высокоазотистых фаз и образованием дефектов структуры (эффект «тёмной составляющей»), которые заполняются углеродом, имеющим при этой температуре намного большую активность, чем азот.

В результате за относительно короткое время (650°C, 3 ч +850°C, 3 ч) на поверхности изделия получается графитизированный слой глубиной до 0,2 мм с содержанием графита до 7%. Степень графитизации при двухступенчатой нитроцементации ниже, чем при высокотемпературной цементации с графитизирующим отжигом, однако она достаточна для повышения износостойкости большой номенклатуры деталей. Закалка графитизированных изделий при использовании двухступенчатой нитроцементации может производиться непосредственно с нитроцементационного нагрева, что очень удобно как

для массового, так и для единичного производства.

Здесь следует отметить, что покрытия, которые предполагается подвергать графитизации, не должны содержать в своём составе хрома, который уже в небольших количествах подавляет графитизацию и способствует образованию карбидов при науглероживании.

Для деталей, работающих в условиях трения со смазкой, целесообразно использовать низкотемпературные технологии химико-термической обработки, которые позволяют получать на поверхности изделий нитридные и карбонитридные слои, отличающиеся высокой твёрдостью и низким коэффициентом трения. При этом толщина упрочнённых слоёв не имеет решающего значения, поскольку износы таких деталей по большей части незначительны.

В составе покрытий, наносимых на поверхности деталей при их комбинированном упрочнении должны входить нитридо- и карбидообразующие элементы (V, Mo, W, Ti, Cr, Al и др.), так как чистые нитриды (карбонитриды) железа имеют недостаточно высокую твёрдость и высокую хрупкость и не могут обеспечить требуемый упрочняющий эффект.

В качестве комбинированного метода упрочнения деталей, работающих в условиях граничного трения, можно использовать гальваническое осаждение на их поверхности железохромистого покрытия, толщиной ~ 0,3 мм с последующим цианированием в соляной ванне.

Для такого метода была разработана ванна на основе карбамида с добавками соединений натрия (NaCO<sub>2</sub>, NaCl и NaOH). Активность такой ванны в интервале температур 550...650°C весьма высока, на уровне активности цианистых ванн, широко используемых за рубежом (процесс Tenifer-Tufftride). Цианирование железохромистого покрытия в этой ванне при температуре 570°C (в режиме «мягкого азотирования») приводит к образованию тонкого поверхностного слоя карбонитрида ε.

Карбонитридный слой имеет высокую твёрдость (~ 15 000 МПа) и не склонен к хрупкому разрушению, твёрдость переходной зоны (под слоем карбонитридов) плавно уменьшается от поверхности к сердцевине, что является большим преимуществом данного метода упрочнения, так как не вызывает резкого перепада напряжений по сечению слоя.

Глубину цианированного слоя следует выбирать равной толщине нанесённого покрытия. При толщине гальванического покрытия 0,3 мм время обработки в ванне должно быть равным 4,5 ч (скорость роста карбонитридного слоя при температуре 570°C составляет ~ 0,07 мм).

При необходимости получения более толстых слоёв карбонитридов на поверхности целесообразно увеличить температуру цианирования

до 650°C. При этой температуре скорость роста карбонитридной корки возрастает примерно в 2 раза, однако твёрдость её несколько уменьшается до ~ 10 000 МПа, что во многих случаях, вполне достаточно для обеспечения высокой износостойкости.

В результате низкотемпературного цианирования в поверхностном слое гальванического железохромистого покрытия (после охлаждения в воде) возникают сжимающие напряжения, величина которых достигает  $\sigma_{сж} = 380...650$  МПа (чем тоньше карбонитридный слой, тем выше напряжения). Это благоприятно сказывается на усталостной прочности упрочняемых деталей.

Износостойкость цианированных слоёв в условиях граничного трения в 8...10 раз выше износостойкости закалённой стали.

Следует отметить, что при цианировании гальванических покрытий возрастает прочность сцепления их с основой, а при достаточно длительном процессе глубина насыщения превышает толщину покрытия и граница между ними исчезает.

Низкотемпературной обработкой можно упрочнять гальванические покрытия не только на основе железа, но и чисто хромовые покрытия. Известны работы И. Покорска [1] по упрочнению электрохимических осадков хрома азотированием в тлеющем разряде. Полученные таким методом композиционные покрытия, содержащие на поверхности нитриды хрома отличаются очень высокой твёрдостью, до 26 000 МПа. Износостойкость такого покрытия в 3 раза выше, по сравнению с износостойкостью гальванического хрома, кроме того, азотирование повышает коррозионную стойкость хромовых покрытий, так как трещины в слое хрома заполняются в процессе обработки нитридами хрома.

Легирование поверхностных слоёв стальных изделий при комбинированном упрочнении можно производить лазерной обработкой. Азотирование после предварительного лазерного легирования поверхности стали дополнительно повышает твёрдость, созданную лазерным легированием, и устраняет недостатки лазерной обработки, главным из которых является большой перепад внутренних напряжений на границе зоны лазерного воздействия с матрицей.

Как показано в работах О.В. Чудиной [2] применение такой схемы обработки наиболее эффективно, если при лазерном легировании вводят нитридообразующие элементы. При этом удаётся получить необычайно высокую микротвёрдость поверхности на низколегированной стали (до 20 000 МПа), повысить в 1,3...3 раза износостойкость по сравнению с азотированной сталью 38Х2МЮА, а также перераспределить внутренние напряжения в поверхностных слоях и тем самым устранить возможность возникновения трещин на границе легированного слоя мат-

рицы.

Известен пример комбинированного упрочнения стальных деталей путем нанесения гальванических железных покрытий с последующим диффузионным борированием [3]. Насыщение бором производится в порошковой смеси: карбид бора – 65%, оксид алюминия – 35%. Температура процесса 980°C длительность – 2...6 ч.

В результате получают борированные слои, упрочняющей фазой в которых является Fe<sub>4</sub>B, глубиной от 0,1 до 0,25 мм с микротвёрдостью 14000...16000 МПа. Борирование увеличивает прочность сцепления с основой и значительно повышает износостойкость. Этот метод рекомендуется для восстановления и упрочнения деталей, работающих в абразивных средах.

К настоящему времени разработано множество комбинированных способов упрочнения режущего и штамповочного инструмента, среди которых значительное место занимают методы, сочетающие технологии поверхностного упрочнения инструментальных материалов (ХТО, лазерный нагрев, вибрационную обработку и др.) с последующим нанесением тонких (2...10 мкм) «плёночных» покрытий из высокотвёрдых, жаростойких, износостойких и др. материалов.

Формирование твёрдой подложки и нанесение на неё методами химического (CVD) или физического (DVD) осаждения высокотвёрдых покрытий микронной толщины позволяет существенно повысить стойкость инструментов.

Тонкие покрытия на металлических поверхностях могут быть получены, например, методами конденсации вещества из плазменной фазы в условиях ионной бомбардировки в вакууме (метод КИБ). Ионно-плазменные покрытия, подученные этим методом имеют незначительную толщину (максимальная прочность наблюдается при толщине 5...10 мкм) и хорошие адгезионные свойства. После нанесения покрытий требуется механическая обработка, они не изменяют механических свойств подложки.

Для осуществления этого метода отечественной промышленностью созданы установки («Булат», «Пуск» и др.), предназначенные, в основном, для нанесения нитрида титана на инструмент из быстрорежущих сталей и твёрдых сплавов. За 20...30 минут обработки осаждается покрытие толщиной 4...6 мкм, с микротвёрдостью 24 000...26 000 МПа. Стойкость инструмента после такой обработки повышается в 2...5 раз.

Одним из перспективных методов комбинированной обработки инструмента и ответственных изделий из стали и сплавов (например никелевых) может быть нанесение на поверхности электроискровых покрытий с их последующей упрочняющей обработкой [4].

Электроискровые покрытия получают в результате переноса материала электрода на упрочняемые поверхности при импульсном ис-

кровом разряде. При этом в разряде концентрируется энергия достаточная для эрозии самых твёрдых и тугоплавких материалов. В качестве упрочняющих электродов возможно применение любых токопроводящих материалов, в зависимости от ожидаемых результатов. Широко используются твёрдые сплавы, составляющими которых являются карбиды вольфрама и титана, различные ферросплавы, белые легированные чугуны, графит и др.

Метод не требует нагрева и последующей термообработки, однако электроискровые покрытия имеют несплошности (раковины, трещины и поры), большую шероховатость и внутренние растягивающие напряжения. Для устранения этих недостатков используется дополнительная обработка – лазерное оплавление, алмазное выглаживание, электромеханическое упрочнение.

Электромеханическая упрочняющая обработка (ЭМО) заключается в высокоскоростном нагреве локальных поверхностных объёмов металла импульсным электрическим током высокой плотности ( $10^8 \dots 10^9$  А/м<sup>2</sup>) при напряжении 2...7 В с одновременной пластической деформацией и последующим быстрым охлаждением. Такая обработка ведёт к образованию на поверхности покрытия бесструктурного «белого слоя», обла-

дающего повышенной твёрдостью и износостойкостью, а также повышает усталостную прочность изделий.

В заключение следует отметить, что в последние годы в научных центрах России и за рубежом (ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН; ИПТМ Черноголовка РАН; ФГУП ОМО им. И.И. Баранова; в Полоцком университете Беларуси; в Национальном университете Украины и многих других) активно ведутся исследования по новым направлениям повышения свойств материалов за счет формирования нанокристаллических структур. Эти материалы, с необычной кристаллической решеткой и размерами морфологических элементов менее 100 нм, проявляют уникальные свойства, намного превосходящие свойства традиционных материалов. Создание таких материалов, покрытий и упрочняющих слоев приведет к коренному улучшению триботехнических, противоизносных, прочностных и других свойств изделий. Широкое распространение наноматериалов будет способствовать оптимизации конструкций и может изменить само понятие конструкционного материала. Это направление является в настоящее время наиболее перспективным в развитии комбинированных упрочняющих технологий.

#### **Список использованной литературы:**

1. Покорска, И. Свойства композиционных слоев, полученных комбинированной обработкой [Текст]/ И.Покорска // Металловедение и термическая обработка металлов, №11, 2005. – С. 5-7.
2. Чудина, О.В. Упрочнение поверхности сталей легированием при лазерном нагреве с последующей химико-термической обработкой [Текст]/ О.В.Чудина, Т.М.Боровская // Металловедение и термическая обработка металлов, №7, 1997. – С. 11-14.
3. Казанцев, С.П. Новая технология получения комбинированных диффузионных покрытий [Текст]/ С.П.Казанцев // Ремонт, восстановление, модернизация, №7, 2003. – С. 30-32.
4. Гадалов, В.Н. Применение тонкопленочных покрытий для повышения стойкости режущего инструмента / В.Н.Гадалов, Ю.В.Болдырев, Д.Н.Романенко и др. // Упрочняющие технологии и покрытия, №5, 2007. – С. 22-25.

*Наведено огляд існуючих методів комбінованої зміцнюючої обробки сталевих деталей машин, розглянуті основні методи комбінованої обробки конструкційних і інструментальних сталей*

*The review of existing methods combined hardening treatment of steel machine parts, the basic methods of combined treatment of structural and tool steels staleylnyh*

Дата надходження в редакцію: 07.06.2012 р.

Рецензент: д.т.н., професор Тарельник В.Б.