

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Появление различных программных продуктов по моделированию процессов, происходящих в металле при нагреве токами высокой частоты (ТВЧ), а также детальная проработка физической и математической моделей, позволяет разрабатывать конструкции и технологии тепловой обработки заготовок и изделий в индукционных нагревательных установках (ИНУ) практически на всех этапах металлургического и машиностроительного производства. Ряд преимуществ над газовыми нагревателями, результат которых очень выгоден экономически, делает применение ИНУ довольно привлекательным для промышленности Республики Беларусь [1].

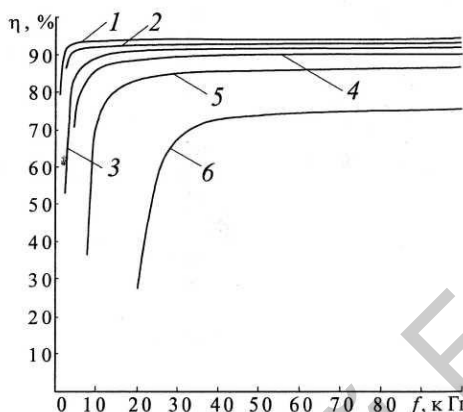
Использование ИНУ в процессах термообработки позволяет добиться конечных результатов с большей точностью и качеством. Более того специальные операции термообработки (например, скоростная закалка) позволяют использовать более дешевые материалы, получая при этом тот же набор конечных параметров. Индукционная закалка характеризуется рядом достоинств, как, например, высокой скоростью нагрева, большей производительностью, меньшим уровнем окисления и обезуглероживания изделия, малой деформацией, лучшими условиями труда, отсутствием загрязнения атмосферы, возможностью осуществления механизации и автоматизации и т. п. Такие системы особенно популярны в машиностроении, в частности – в узлах двигателей. Например, надежная работа различных двигателей внутреннего сгорания в большой степени зависит от работы кулачкового вала, обеспечивающего движение и контроль открытия и закрытия впускных и выпускных клапанов двигателей. Кулачки распределительного вала должны выдерживать интенсивный поверхностный износ трением и сохранять точность размеров их профиля, т.к. точность их геометрии непосредственно влияет на время открытия и закрытия клапанов двигателя и, тем самым, на мощность дизеля и на состав удаляемых газов. Поэтому к материалу и микроструктуре кулачкового вала предъявляются высокие требования. Для кулачковых валов, сделанных из

стали 45 и 50Mn, применяется одинаковый технологический процесс: поперечно-клиноватая прокатка заготовки – грубая обработка – среднечастотная закалка – правка – отпуск – шлифовка – готовое изделие. Что касается кулачкового вала, сделанного из прокаливаемого легированного чугуна, единственная разница состоит в изготовлении заготовки, а остальной процесс ничем не отличается. Для кулачкового вала, сделанного из стали 45, было трудно выдерживать глубину закаленного слоя после индукционной закалки и твердость после отпуска, что не позволяло обеспечивать достижения стабильных параметров закалки. Возможно, это было связано с колебанием химического состава и недостаточной прокаливаемостью данной марки стали.

Кулачковый вал, выполненный из стали 50Mn методом поперечно-клиноватой прокатки и нормализованный с охлаждением на воздухе, имеет исходную микроструктуру пластинчатого перлита + феррита, подвергается среднечастотной закалке, что обеспечивает получение изделия высокого качества. При этом производительность термообработки была значительно увеличена. В сравнении с цементируемым и закаленным кулачковым валом, сделанным из стали 20Сг, полная себестоимость стального кулачкового вала из стали 50Mn на единицу по горячей обработке была уменьшена в 2,3 раза [2].

Помимо нагрева цельных заготовок, ИНУ можно применять и для нагрева проволоки и изделий на ее основе. Индукционный нагрев при термообработке проволоки получил широкое распространение благодаря сравнительной простоте, высокой эффективности и сравнительно легкой интеграции установок в непрерывную линию с другими технологическими агрегатами. В установках непрерывного действия удается достичь более высокого качества термообработки по сравнению с термообработкой проволоки в бунтах. На современном этапе наибольшее распространение для отжига движущейся проволоки получили овальные индукторы. К сожалению, если использовать овальный индуктор для нагрева одной нити тонкой проволоки, то достичь высоких значений КПД будет проблематично. Однако при производстве проволоки на многониточных устройствах можно осуществлять отжиг не одной нити, а нескольких одновременно (рисунок 1). Также увеличение числа про-

волок в пучке позволяет использовать более низкую частоту при сохранении прежнего уровня КПД [3].

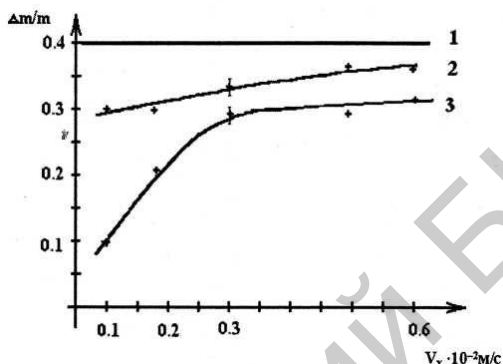


1 – 8 мм; 2 – 6 мм; 3 – 4 мм; 5 – 2 мм; 6 – 1 мм

Рисунок 1 – КПД ИНУ при нагреве пучка из 12 нитей проволоки различных диаметров [3]

Помимо обычной поверхностной закалки, индукционный нагрев применяется и для упрочнения поверхностного слоя другими элементами: борирование, силицирование, азотирование и т.д. В работе [4] исследуется возможность получения тонких высокопрочных борированных слоев на деталях из средне- и высокоуглеродистых сталей методом совмещения процесса легирования и высококонцентрированного индукционного нагрева. Быстрый разогрев стальной подложки вихревыми токами приводит к расплавлению и термическому разложению борсодержащей пасты, тем самым резко ускоряя процессы диффузии бора в подложку. В результате исследований определена зависимость глубины борирования от основных параметров процесса: скорости движения индуктора относительно подложки, уровня энергии, выделяемой в подложке в единицу времени, а также формы индуктора и состава борсодержащих паст. Проведенные производственные испытания режущего инструмента с борированным поверхностным слоем показали, что разработанный метод по сравнению с используемым методом лазерной

закалки в 2,5 раза производительней и более чем в 10 раз энергетически экономичнее. Авторами работы [4] разработана модель электромагнитных, тепловых и диффузионных процессов, получено удовлетворительное согласие результатов расчетов глубины диффузионного борирования с опытными данными (рисунок 2).



1 – исходная сталь; 2 – паста «аморфный бор + ПЭФ»;
3 – паста «карбид бора + криолит + ГЭС»

Рисунок 2 – Зависимость относительно износа поверхности образца от скорости обработки [4]

В то же время применение индукционного нагрева не ограничено обычной сталью. ИНУ используются в работе с такими материалами, как алюминий и, особенно, титан. Анализы мировых тенденций и прогнозов в области применения металлических сплавов до 2020 года показывают, что титановые сплавы являются перспективными материалами широкого назначения. Получение литых заготовок из титана затруднительно из-за его высокой химической активности, поэтому ведутся работы по устранению контакта жидкого металла с атмосферой без использования вакуумной системы или защитной атмосферы. Вследствие скин-эффекта при индукционном нагреве тепловые источники распределены по сечению заготовки неравномерно: максимальное тепловыделение происходит на поверхности, с увеличением расстояния от поверхности интенсивность источников тепла падает. Соответственно поверхностные слои имеют более высокую температуру, чем середина, причем эта

разность температур тем больше, чем больше мощность, на которой осуществляется нагрев, и чем выше частота тока. При этом по мере разогрева заготовки происходит рост тепловых потерь в окружающую среду. Отвод теплоты с внешней поверхности качественно отражается на характере температурного поля: вследствие охлаждения поверхности в глубине заготовки образуется зона, имеющая более высокую температуру, чем поверхность. Это явление имеет место при индукционном нагреве всех металлов, однако для титановых сплавов оно сильно проявляется из-за низкой теплопроводности и высокого уровня тепловых потерь. Перегрев внутренних слоев металла может привести, в конечном счете, к расплавлению внутренних слоев. В данном случае поверхность титановой заготовки будет служить защитным слоем гарнисажа и защитит расплав от примесей, не позволив ему реагировать со средой. Следовательно, для титана возможно путем подбора параметров установки и изменением условий технологического процесса добиться получения расплава внутри слитка [5].

Для создания наиболее эффективных условий надежного функционирования титановых изделий и конструкций проводят модификацию их поверхности газотермическими, вакуумно-конденсационными или физико-химическими методами, позволяющими придать поверхностным слоям изделий широкий спектр физико-химических, механических, теплозащитных и других свойств и характеристик. Однако недостатком данных методов является значительная энергоемкость, необходимость использования сложной технологической последовательности операций, а также дорогостоящих материалов, например, микропорошков определенной дисперсности, компактных материалов для мишеней, жидких или газообразных прекурсоров.

В связи с этим актуальной является разработка технологии формирования функциональных пленок и покрытий с морфологически гетерогенной микроструктурой и однородной наноструктурой в сочетании с высокой механической прочностью за счет использования интенсивного нагрева токами высокой частоты основного металла малогабаритных титановых изделий с применением разработанного устройства индукционно-термической обработки (ИТО) [6]. Разработанное устройство ИТО малогабаритных титановых изделий обеспечивает ускоренное модифицирование их поверхностного

слоя металлоксидными соединениями. Достижение заданной температуры индукционного нагрева, составляющей 600–1200 °С, обеспечивается за промежуток времени, характеризующийся интервалом от 10 до 30 с, соответственно. Изменяя величину потребляемой мощности, можно управлять величиной и скоростью индукционного нагрева, контролировать процесс выдержки при заданной температуре, задавать необходимый вид термического цикла, а также скорость охлаждения.

В заключение необходимо отметить, что применение ИНУ практически неограниченно. Индукционная система нагрева – одно из наиболее пластичных и простых систем и имеет большой потенциал. В настоящий момент, помимо совместимости с титановыми и алюминиевыми сплавами, прорабатывается взаимодействие с никелевыми, ванадиевыми и прочными специальными сплавами как гражданского, так и стратегического назначения.

Литература

1. **Гордиенко, А.И.** Индукционная термическая обработка в машиностроении: анализ, проблемы и перспективы развития в Республике Беларусь / А.И. Гордиенко, А.И. Михлюк, И.И. Вегера // Индукционный нагрев. – 2014. – № 1. – С. 16–23
2. **Лю Юй-Хун.** Среднечастотная индукционная закалка кулачкового вала из стали 50Mn / Лю Юй-Хун, Хэ Ци-Чжун, Чжан Цзя-Сюн // Индукционный нагрев. – 2013. – № 3. – С. 41–44.
3. **Демидович, В.Б.** Моделирование индукционного нагрева стальной проволоки / В.Б. Демидович, Ф.В. Чмиленко, П.А. Ситько // Электричество. – 2014. – № 8. – С. 61–64.
4. **Щукин, В.Г.** Индукционное борирование сталей / В.Г. Щукин, В.В. Марусин // Материаловедение. – 2014. – № 4. – С.27–32.
5. **Инновационные технологии** обработки титановых сплавов с применением индукционного нагрева / В.Б. Демидович [и др.] // Индукционный нагрев. – 2012. – № 2. – С. 26–29.
6. **Фомин, А.А.** Оборудование для индукционно-термической обработки малогабаритных титановых изделий / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов // Индукционный нагрев. – 2013. – № 2. – С. 44–47.