

практически не проникает в глубь образца, а оседает на его поверхности.

Слой $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ хорошо обволакивают поверхностные частицы матрицы, плотно прилегая к ним. Следует особо подчеркнуть, что $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ при всех режимах консолидации «алюмосиликатная керамика – вторичный носитель» имеет прочную адгезионную связь с материалом матрицы. Отслаивание покрытия в результате усадки при прокаливании бемита (для образцов со значительной толщиной) происходит в местах структурной неоднородности матрицы – над поровым пространством.

Многочисленное нанесение слоев бемита приводит к сглаживанию рельефа поверхности слоя оксида алюминия при практически полном закупоривании пор матрицы. В местах расположения наиболее крупных пор в алюмосиликатном материале на поверхности сформированного слоя $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ наблюдаются кратероподобные элементы структуры, образовавшиеся, вероятно, в результате наиболее длительного оседания бемита в этих местах.

УДК 536.46

Вебера И.И., Польшаев А.В., Маталыго А.И., Булан Д.И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООБРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск

В настоящее время перед промышленностью остро стоит проблема выпуска качественной и конкурентоспособной продукции. Требования качества в полной мере относятся и к процессам термообработки изделий, которые играют очень важную роль в обеспечении технологических и эксплуатационных свойств деталей.

Особенностью технологической подготовки производства деталей, подвергаемых термообработке, является необходимость анализа обоснованности назначения режимов их обработки уже на стадии проектирования. Традиционно этот анализ осуществляется экспериментальными методами, с применением разрушающих методов контроля и металлографии, что связано с большими затратами времени и материальных средств. Одним из эффективных направлений решения указанных проблем является применение методов компьютерного моделирования, которые при минимальном количестве дорогостоящих экспериментальных исследований позволяют получить максимальное количество информации о характеристиках разрабатываемого процесса и свойствах полученных изделий. Мировая тенденция развития данного направления заключается в применении CALS-технологии, то есть сквозной автоматизации всего жизненного цикла изделия.

Методы математического моделирования позволяют рассматривать различные стадии производства и эксплуатации изделий в режиме «реального» времени. Поскольку фактически любой процесс, происходящий в окружающем мире, можно описать при помощи математических моделей с той или иной точностью, то используя современные высокопроизводительные ЭВМ можно осуществлять прогнозирование поведения изделия, как в процессе его изготовления, так и при эксплуатации. Адекватность моделей зависит лишь от точности, с которой проводится исследование. Для обеспечения более высокой точности используется большее количество уравнений и итераций, соответственно требуется большее время для моделирования. Математическое моделирование процессов термообработки невозможно без детального изучения и анализа: кинетики фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах; теплофизических процессов происходящих при нагреве; процессов формирования физико-механических и технологических свойств деталей.

Процесс термической обработки сталей можно разделить на следующие этапы: нагрев до определенной температуры, поддержание при этой температуре и охлаждение. На данных этапах происходят следующие теплофизические процессы: теплопередача от окружающей среды к детали; распределение тепловой энергии в объеме детали; фазовые и структурные превращения, происходящие с выделением или поглощением тепла; упругие и пластические деформации, происходящие вследствие изменения температуры детали и фазовых превращений.

Прогнозирование протекания этих процессов при нагреве, их влияние на получаемые свойства деталей и является задачей моделирования. В наши дни в области CAE (Computer Aided Engineering) моделирования теплофизических процессов и устройств находят применение универсальные и специализированные программные средства.

Универсальные программные средства предоставляют возможность моделирования различных физических процессов в одной программной оболочке с возможностью их адаптации для анализа конкретного технологического процесса или конструкции. В них, как правило, предусмотрено несколько уровней ветвления хода решения задачи, что придает таким пакетам некоторую сложность и трудоемкость в использовании, и повышенные требования к квалификации пользователей. К таким программным средствам можно отнести MSC. NASTRAN, MSC. MARC, ANSYS, ABACUS и др.

В свою очередь специализированные программные средства предназначены для моделирования одного или нескольких, близких по физическим основам технологических процессов (например, закалка, литье, штамповка). К специализированным программным средствам, которые можно применять для моделирования процессов термообработки, можно отнести DEFORM-3D, Ind, ThermoSim, IndHeat.

Например, система DEFORM-3D предназначена для трехмерного анализа процессов обработки металлов давлением,

а также процессов термообработки при установке дополнительного модуля DEFORM-HT. Таким образом, программный комплекс DEFORM-3D с модулем DEFORM-HT может успешно применяться для анализа процессов термообработки. В качестве недостатков следует отметить высокую стоимость, а также ограниченность базы данных свойств фаз материалов, что не позволяет моделировать процессы термообработки легированных сталей, без проведения предварительных экспериментальных исследований данных материалов.

Программа Ind, разработанная в Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, позволяет проводить математическое моделирование индукционного нагрева и охлаждения, выполнять теоретическое построение термических кривых нагрева и охлаждения для любой точки поверхности и сечения обрабатываемой детали. Следует отметить, что программа Ind работает только с двухмерными моделями деталей, в процессе моделирования не учитываются напряженно-деформированное состояние детали и фазовые превращения, что снижает возможности ее практического применения и точность получаемых результатов.

Программный комплекс ThermoSim для моделирования процессов термообработки – разработан совместно БГУИР и МГЭУ им. А.Д.Сахарова. Он реализует 3D-модель процесса термообработки, особенностью которого является математическое описание распределения температур, напряженно-деформированного состояния, твердости детали с учетом фазовых превращений, образования трещин, а также релаксации напряжений за счет пластических деформаций.

Программный пакет IndHeat], разработанный в ВНИИТВЧ (Санкт-Петербург), совместно с ЭСТЭЛ (Эстония), состоит из пяти модулей, предназначенных для моделирования процессов индукционного нагрева:

Реализованные в IndHeat модели основаны на использовании различных численных методов решения электромагнитной

и тепловой задачи (МКЭ, МКР и метод интегральных уравнений) и их комбинации. Результаты расчетов представляются в наглядном текстовом и графическом виде.

IndHeat является одним из лучших программных пакетов для моделирования индукционного нагрева. Он содержит обширную базу как нагреваемых материалов (цветные, черные металлы и сплавы, графит, керамика), так и конструкционных, и теплоизолирующих. Недостатком данной программы является, отсутствие возможности импорта и экспорта геометрии моделей деталей, что снижает возможности его применения, однако при этом упрощает практическое использование менее подготовленными пользователями.

Исходя из приведенного анализа, можно сделать вывод, что применение специализированных программных средств значительно ускоряет процесс моделирования термообработки деталей, особенно при накоплении базы данных экспериментальных исследований по свойствам, фазовому составу и структуре различных металлов и сплавов. Их использование особенно актуально в научных и учебных организациях, а так же на крупных промышленных предприятиях, имеющих в своем составе опытные конструкторские отделы и центральные заводские лаборатории. В заключении следует отметить, что настоящее время в Беларуси уделяется недостаточно внимания вопросам моделирования процессов термообработки, особенно при использовании индукционного нагрева. На это имеется целый ряд причин, основными из которых на наш взгляд являются: отсутствие на промышленных предприятиях необходимых программных комплексов, отсутствие квалифицированных кадров для использования современных САПР. Поэтому только комплексное решение следующих проблем: обучение молодых специалистов, исследования свойств и структуры материалов, разработка современных технологий и оборудования, автоматизация и компьютеризация технологического оборудования, контроль качества всех этапов производства позволит

процессам с применением термического нагрева деталей стать экономически эффективными, высокопроизводительными, рентабельными и безопасными.

УДК 621.793

Гладкий В.Ю., Комаровская В.М.,
Латушкина С.Д., Терещук О.И.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО ОСАЖДЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ТИТАНА

БНТУ, Минск

Разработана математическая модель, учитывающая зависимость микротвердости многокомпонентного покрытия от технологических параметров процесса осаждения с целью их оптимизации при формировании конденсатов с высокими защитными свойствами.

В качестве параметра оптимизации при математическом моделировании была выбрана микротвердость покрытия как характеристика, позволяющая дать сравнительную оценку износостойких свойств покрытий. Ток дугового разряда титанового катода I_1 , ток дугового разряда цирконьевого катода I_2 , давление реакционного газа P , потенциал смещения на подложке U_n , являются факторами, влияющими на параметр оптимизации.

Выбранные уровни интервалов варьирования указанных факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов
в натуральном масштабе

Изучаемый фактор	I_1 , А	I_2 , А	P , Па	U_n , В
Верхний уровень	80	80	0,16	80
Нижний уровень	40	60	0,04	40