

УДК 658.512.011.56: 621.3

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

С.П. КУНДАС, Б.А. ТОНКОНОГОВ, Т.А. КАШКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 26 ноября 2003

В статье приведен обзор разработок авторов в области компьютерного моделирования технологических процессов, в частности, процессов ультразвукового плющения лент, плазменного напыления покрытий и термообработки. Представлена предложенная концепция комплексного моделирования, базирующаяся на сквозном описании физических процессов, влияющих на качество изготавливаемых изделий, имитационном походе к моделированию, использовании элементов экспертных систем. Обсуждаются разработанные математические модели, программные комплексы и перспективы дальнейшего развития исследований в этой области.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, ультразвуковые, плазменные технологии, термообработка.

Введение

В настоящее время в связи быстрым моральным старением изделий (особенно в области электронной и вычислительной техники) большое значение имеет сокращение сроков их освоения в производстве. Поэтому ведущие фирмы все шире применяют гибкие производственные системы, интегрированные компьютерные производства (СІМ – Computer Integrated Manufacturing), которые базируются на автоматизации всего жизненного цикла изделий начиная от их разработки и заканчивая эксплуатацией и утилизацией [1].

Большое значение для практической реализации концепции СІМ имеет автоматизация стадий научных исследований и технологической подготовки производства (создание подсистем АСНИ – автоматизированные системы научных исследований, АСТПП – автоматизированные системы технологической подготовки производства). Кроме этого, в связи с дорогой стоимостью материалов, исследовательского и технологического оборудования, натурное изучение различных процессов в лабораторных условиях не всегда представляется возможным и во многих случаях связано со значительными затратами материальных и денежных средств. Особенно эта проблема актуальна при исследовании и разработке быстропротекающих процессов, связанных с электрофизическими методами обработки материалов в условиях высоких температур, давлений окружающей среды. Например, при плазменном напылении покрытий температура плазменной струи может изменяться в пределах 2000 - 15000 К, скорость – до 800 м / с, что требует для проведения экспериментальных исследований уникальной дорогостоящей аппаратуры [1, 2].

Эти проблемы можно решить с помощью современных методов компьютерного моделирования, которые при минимальных затратах времени и материальных средств позволяют изучать и исследовать различные процессы, проводить их оптимизацию с выходом на конкретные вопросы проектирования самих изделий, разработку технологических процессов и при со-

ответствующей организации и техническом оснащении — на подготовку управляющих программ и автоматизированное изготовление изделий с помощью гибких производственных систем [1- 4].

Лаборатория компьютерного моделирования технологических процессов кафедры "Электронная техника и технология" БГУИР на протяжении последних 15 лет проводит исследования и разработки в области компьютерного моделирования технологических процессов, в частности, ультразвукового метода изготовления лент из тугоплавких металлов и сплавов для МГП, плазменного напыления покрытий, термической обработки металлических деталей [1-8]. В настоящей статье представлен обзор разработанных математических моделей и реализующих их программных средств.

Комплексный подход к моделированию технологических процессов

Основой выполненных разработок является комплексный подход к моделированию технологических процессов, основными положениями которого являются [6, 7]:

сквозное математическое описание всех основных стадий и процессов в соответствии с логической последовательностью их протекания с учетом зависимости свойств материалов от условий их обработки (температура, давление и др.);

реализация с помощью математических методов и программных средств возможностей решения как прямых, так и обратных задач моделирования;

решение задач оптимизации исследуемого технологического процесса или конструкции по заданной целевой функции;

введение в состав программных комплексов элементов экспертных систем для анализа результатов исследований и выбора наиболее оптимальных режимов изучаемых процессов;

создание на основе моделирующих программных средств САПР ТП, а также автоматизированного оборудования с гибким программным управлением.

Для пояснения изложенной выше концепции рассмотрим особенности ее применения к конкретным теплофизическим и динамическим процессам, имеющим место на различных стадиях плазменного напыления покрытий [6].

Предпосылками для организации комплексного моделирования указанных процессов являются обеспечение возможности передачи данных с одной стадии на другую и общность их структуры. Исходя из этого, входными данными для модели генерации плазменной струи будут конструктивные параметры плазмотронов, электрические характеристики, состав и массовый расход плазмообразующего газа, данные о температурной зависимости свойств. На выходе этой модели должно быть распределение температуры и скорости в незагруженной плазменной струе на участке от ввода частиц в плазменную струю до основания. Эти данные будут входными для модели 2-й стадии процесса наряду с информацией о массовом расходе напыляемого порошка, его размерах и свойствах, массовом расходе, составе и свойствах транспортирующего газа.

На выходе модели плазменной струи будет массив данных о распределении во времени и пространстве температуры и скорости частиц и плазмообразующего газа. Кроме того, входными данными для 3-й стадии процесса будут конфигурация, материал основания и его свойства, теплоотвод на устройства крепления или характеристики принудительного охлаждения, температура окружающей среды, толщина напыляемого покрытия и свойства материала, скорость и закон перемещения распылительного пистолета.

Результаты моделирования 3-й стадии процесса: информация о характере деформирования расплавленных частиц порошка при соударении с основанием; форма, размеры и координаты попадания частицы в определенную точку основания; шероховатость поверхности покрытия, содержание пор; распределение температуры и остаточных напряжений в системе покрытие-основание; энергия или прочность сцепления покрытия с основанием.

При комплексном моделировании реализуется схема сквозной передачи данных от одной модели (стадии процесса) к другой и их динамическое изменение при вычислениях. Информация, общая для всех стадий моделирования, может находиться в базе данных, специальном файле или в оперативной памяти и использоваться каждой моделью по мере необходимости.

сти. В базе данных могут находиться также результаты промежуточных расчетов всех стадий процесса, что позволяет осуществлять независимое исследование какой-то отдельной стадии с использованием данных предыдущих расчетов или требуемая информация вводится пользователем с клавиатуры.

Наиболее перспективными математическими методами описания рассмотренных выше процессов плазменного напыления покрытий является так называемый "метод вычислительной динамики жидкостей" (Computational Fluid Dynamics (CFD)), основанный на решении уравнений Навье-Стокса в полной постановке (моделирование плазменной струи) и метод конечных элементов (моделирование системы "покрытие-основа") [6].

Как было отмечено выше, разрабатываемые модели должны быть ориентированы на их последующую практическую реализацию в виде программных комплексов для определенного класса вычислительной техники, практически применяемого в научных исследованиях и производстве, а также учитывать перспективы ее дальнейшего развития.

Моделирование процессов ультразвукового микропластического деформирования металлов и сплавов

Процессы ультразвукового микропластического деформирования (УМД) (ультразвуковое плющение лент для деталей МПП) [2], ультразвуковая навивка спиралей ЛБВ [3], изготовление контакт-деталей герконов [3], разработанные в БГУИР, нашли широкое практическое применение в технологии изделий электронной техники. В проведенных авторами исследованиях [2, 3] показано, что наиболее эффективным направлением дальнейшего развития теории и практики этих процессов является применение методов компьютерного моделирования. В работах [2, 3] установлены общие закономерности и предложены концепция и схема комплексного моделирования методов формирования конструктивных элементов электронных приборов, основанных на применении ультразвука. Концепция базируется на использовании принципов сквозной передачи данных, общей базы данных свойств веществ, участвующих в исследуемых процессах, конвейерных методов их обработки, учете температурной зависимости свойств материалов. Исходя из предложенной концепции, разработаны взаимосвязанные математические модели всех стадий процессов УМД.

Для математического описания нагрева металла перед деформированием и теплопередачи в системе металл-инструмент разработана модель, базирующаяся на применении теории метода конечных элементов, которая описывает динамику изменения температуры деформируемого металла в процессе его нагрева инфракрасным излучением и прямым пропусканием тока, а также при взаимодействии с обрабатывающими инструментами.

Температурное поле в рассматриваемой задаче описывается уравнением теплопроводности, являющимся частным случаем уравнения Навье-Стокса, которое в матричном виде можно представить как [9]:

$$\left([K] + \frac{2}{\Delta\tau} [C] \right) \{T\}_1 = \left(\frac{2}{\Delta\tau} [C] - [K] \right) \{T\}_0 - 2\{F\}^* - 2V[C] \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (1)$$

где $[C]$ — матрица теплоемкости; $[K]$ — матрица теплопроводности; $\{T\}$ — вектор узловых температур; $\{F\}$ — вектор нагрузки.

Численное решение системы уравнений (1) позволяет исследовать динамику нагрева и охлаждения металла в зависимости от технологических режимов обработки, что является необходимым для управления рекристаллизационными процессами и соответственно свойствами деформируемого металла.

Для анализа кинематики и динамики процесса УМД разработана модель, учитывающая упругие свойства очага деформации и распространение продольной упругой волны в обрабатываемой заготовке. Такой подход позволил выделить два основных режима взаимодействия металла с инструментами (с разрывом контакта — режим ультразвуковойковки и без разрыва контакта — режим ультразвукового волочения) и шесть различных фаз элементарного цикла УМД: I фаза — упругая разгрузка неподвижной заготовки; II фаза — упругая разгрузка

со скольжением; III фаза — раздельное движение инструментов и заготовки; IV фаза — упругое сжатие со скольжением; V фаза — упругое сжатие неподвижной заготовки; VI фаза — пластическая осадка металла.

На основных положениях теории колебательных систем и физики твердого деформируемого тела разработан итерационный численный алгоритм расчета длительности каждой из фаз взаимодействия и силовых характеристик обработки [2, 3].

В результате анализа упругих характеристик процесса деформации впервые установлено, что основной вклад в общую величину упругой деформации вносит упругая деформация инструментов. Она в свою очередь складывается из прогиба поверхностей и объемной деформации инструментов. Показано, что величина прогиба поверхностей определяется распределением контактных напряжений. Объемная деформация инструментов не зависит от закона распределения контактных напряжений по поверхности и определяется только силой давления заготовки, поэтому для ее расчета применена модель на основе объемной жесткости инструмента, величина которой определена экспериментально. Результаты моделирования кинематических и динамических характеристик применительно к процессу ультразвукового плющения показаны на рис. 1.

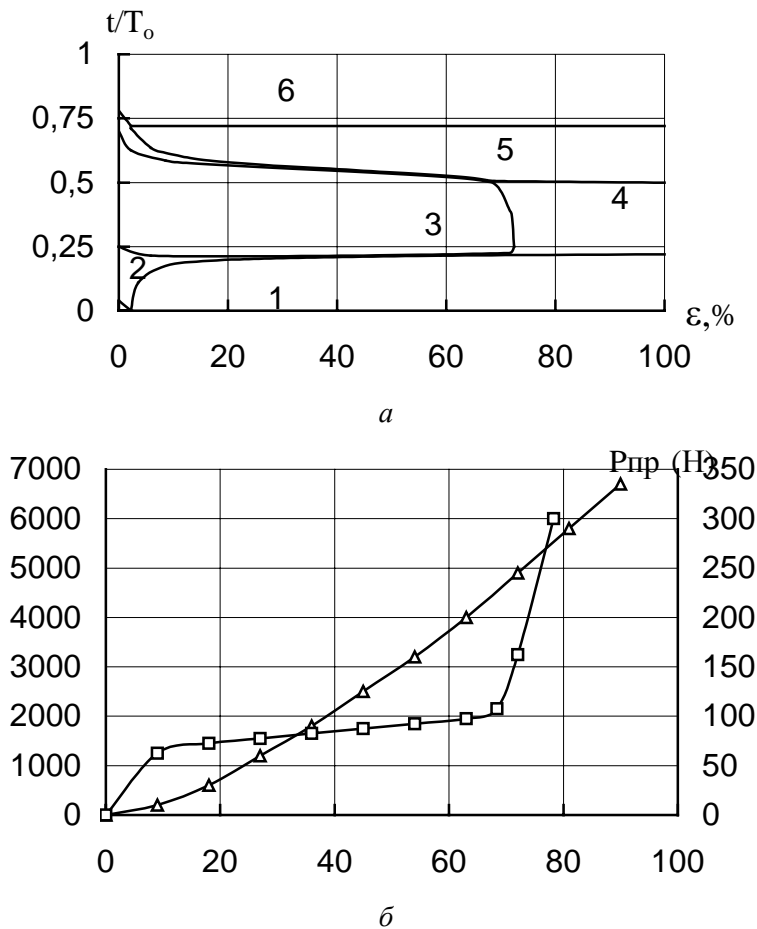


Рис. 1. Зависимость параметров кинематики УМД (а), усилий плющения ($P_{пл}$) и протягивания ($P_{пр}$) (б) от степени деформации металла за проход.

При разработке физической и математической модели процесса ультразвуковой навивки ленточных спиралей ЛБВ учтены особенности взаимодействия инструментов с заготовкой на вращающемся керне [10].

Математическая модель формоизменения металла при УМД разработана исходя из особенностей осадки металла ультразвуковыми инструментами. Установлено, что для исследуемого процесса (в сравнении с традиционными методами обработки металлов давлением) характерна более высокая вытяжка металла, что объясняется наличием растягивающих напряжений в

процессе деформирования и более сложной формой деформирующей части инструментов. Соотношение между деформациями уширения и вытяжки ленты, в первую очередь, определяется соотношением длины и ширины контактной площадки инструментов.

Исходя из гипотезы равенства абсолютных приращений длины и ширины заготовки в элементарном акте осадки, с учетом результатов экспериментальных исследований получены аналитические выражения для расчета ширины ленты и размеров контактной площадки при ультразвуковом плужении заготовок в виде круглой проволоки и прямоугольной ленты инструментами с произвольным углом захода и шириной калибрующей площадки.

Анализ разработанных математических моделей показал, что определяющий параметр процессов УМД — это соотношение амплитуды ультразвуковых колебаний и величины упругой деформации. Если размах колебаний оказывается меньше величины суммарной упругой деформации, то процесс УМД переходит из режима ультразвуковойковки в режим волочения, что вызывает резкое увеличение силовых характеристик обработки (см. рис. 1) и ухудшает качество изготавливаемых лент. Поэтому в [2, 3] проведен обстоятельный физический и математический анализ работы ультразвуковых колебательных систем, применяемых при УМД, в результате которого на основе метода гармонической линеаризации разработана обобщенная численная модель нагруженной колебательной системы и установлена связь между амплитудой колебаний в установившемся режиме, динамической жесткостью колебательной системы и внешним силовым воздействием в следующем виде [11]:

$$A = \frac{A_0 W(j\omega)}{W(j\omega) + k + j\omega b}, \quad (2)$$

где k и b — коэффициенты гармонической линеаризации; $W(j\omega)$ — динамическая жесткость системы.

Установлено, что силовое воздействие на колебательную систему приводит к повышению ее резонансной частоты и уменьшению амплитуды колебаний (рис.2). Показано, что для расчета амплитуды установившихся колебаний в процессах УМД необходимо определение обобщенного параметра колебательной системы – динамической жесткости, которая рассчитана в работе с применением метода прогонки.

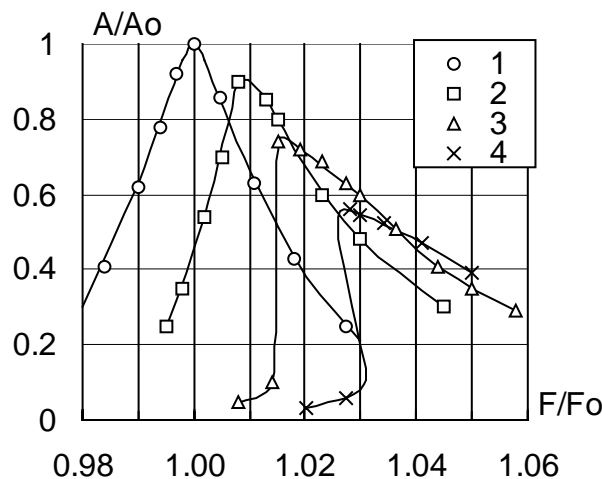


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики колебательной системы под нагрузкой: 1 — P=50; 2 — 100; 3 — 200; 4 — 300Н

Для учета потерь на внутреннее трение в колебательной системе использована модель вязкоупругого поведения Фойхта-Кельвина, на основе которой получено уравнение для амплитудной функции:

$$ES \frac{d^2 u}{dz^2} (1 + nj\omega) + m_0 \omega^2 u = 0, \quad (3)$$

$u(z)$ — комплексная амплитудная функция, характеризующая амплитуду и фазу колебаний в сечении с координатой z ; η — коэффициент внутреннего трения; S — площадь сечения стержня.

Разработанная математическая модель позволяет осуществлять анализ и расчет резонансных характеристик колебательных систем произвольного сечения в зависимости от технологических параметров процесса УМД. По результатам проведенных исследований сформулированы рекомендации по проектированию конкретных стержневых колебательных систем, используемых в разработанном оборудовании.

С применением метода конечных элементов разработана упругопластическая модель напряженно-деформированного состояния (НДС) металла в процессах УМД, основанная на анализе деформаций при циклическом нагружении с помощью метода переменной жесткости и итерационной схемы расчета [2]. Применительно к процессу ультразвуковой навивки ленточных спиралей анализ НДС металла проведен с применением принципа независимости действия деформирующего усилия, изгибающего момента и усилия противонапряжения [10].

Разработанные математические модели практически реализованы в составе программного комплекса Ultrasound, с применением которого возможно проведение в едином цикле компьютерных исследований нагрева деформируемого металла, кинематических и силовых параметров обработки, режимов работы ультразвуковой колебательной системы, геометрических характеристик изготавливаемых лент, их напряженно-деформированного состояния в процессе обработки [2].

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными свидетельствует об адекватности разработанных моделей реальному процессу, что позволяет на их основе осуществлять оптимизацию конструктивных решений и технологических параметров процессов изготовления конструктивных элементов электронных приборов с применением метода УМД. Разработанные с применением компьютерного моделирования ультразвуковые технологические процессы и оборудование внедрены в производство на ряде предприятий электронной промышленности РФ.

Моделирование процессов плазменного напыления покрытий

Анализ протекающих при плазменном напылении теплофизических и динамических процессов показал их полную корреляцию с процессами УМД, что позволило осуществлять разработку математических моделей по общей схеме в соответствии с концепцией комплексного моделирования. В работе впервые в теории плазменного напыления предложена и практически реализована имитационная модель процесса плазменного напыления, которая базируется на моделировании поведения частиц порошка в плазменной струе и при взаимодействии с основанием в соответствии с физической и логической последовательностью протекающих процессов. Предложен статистический подход к описанию взаимодействия частиц порошка с плазменной струей, учитывающий распределение частиц порошка по диаметру, сечению инжектора, случайный характер начальной скорости ввода [8]. Разработана 3D-математическая модель ускорения и нагрева частиц порошка в плазменной струе, отличительной особенностью которой является учет случайных характеристики процесса напыления, наличие градиента температур по сечению частицы и ее испарения при нормальных и пониженных давлениях с учетом температурной зависимости свойств материалов и плазмообразующих газов. Предложена модель формирования профиля покрытия на единичном проходе плазменной горелки, которая отличается от известных учетом траектории движения плазменной горелки и случайных характеристик процесса напыления.

При решении аналогичных задач применительно к условиям разреженных сред использовали законы молекулярно-кинетической теории газов и численные методы описания плазменной струи, что позволило разработать алгоритмы расчета динамики изменения температуры и скорости частиц в плазменной струе в зависимости от технологических параметров напыления [12].

На основе положений теории сплошных сред предложена методика трехмерного моделирования взаимодействия частиц порошка с основанием, включающая в себя математическое

описание полей скоростей, давлений, температур и напряжений с учетом процесса кристаллизации и движения свободной поверхности расплавленной частицы, что позволяет в большей степени приблизить модель формирования структуры плазменных покрытий к реальным условиям напыления. Эта задача решена на основе уравнения Навье-Стокса в приближении Буссинеска [13].

Теплопередача в системе частица-основание описывается с помощью решения 2-мерной задачи теплообмена с учетом гидродинамических процессов в расплавленной частице и сил давления. В отличие от ранее существующих моделей взаимодействия частицы с основанием (В.В. Кудинов, О.П. Солоненко, F. Fukunuma и др.) в разработанной модели предлагается комплексное рассмотрение на математическом уровне взаимосвязанных физических процессов, таких, как удар частицы о твердое основание, ее растекание с учетом кристаллизации и определение свободной поверхности расплава на основе использования функции объема жидкой фазы (F) ($F=1$ при наличии жидкой фазы и $F=0$ при ее отсутствии):

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) F = 0. \quad (4)$$

Так как основной вклад в образование дефектов сплошности плазменных покрытий (трещины, отслоения и др.) вносят напряжения первого рода, то для их анализа разработаны взаимосвязанные модели теплопередачи и формирования температурных напряжений в системе покрытие-основание в одномерном и трехмерном описании.

Разработанные модели практически реализованы в программном комплексе Plasma, который обеспечивает сквозное моделирование основных теплофизических и динамических процессов, оказывающих влияние на качественные характеристики плазменных покрытий (рис.3) [14].

Для трехмерного описания задачи применена теория конечных элементов, реализованная в программном комплексе MARC, который адаптирован к условиям плазменного напыления, динамического изменения толщины покрытия, образования ламелей, пор и реальных размеров напыляемых деталей [15]. Для учета влияния микроструктуры на свойства гипотетического сплошного материала, представляющего собой покрытие в конечно-элементных расчетах НДС системы покрытие-основание, впервые разработаны два семейства алгоритмов гомогенизации, отличающихся различными допущениями о поведении среды в расчетной области [16]. Применение гомогенизации как шага, предваряющего расчет при помощи метода конечных элементов, позволяет более точно предсказать особенности поведения различных плазменных покрытий при термических и механических нагрузках.

На основе предложенной концепции сквозного моделирования процессов плазменного напыления покрытий разработан интегрированный технологический комплекс для исследования и практической реализации процессов плазменного напыления покрытий, применяемых в электронной и других отраслях техники [17]. В состав комплекса входят разработанное оригинальное программно-математическое обеспечение, комплект измерительной аппаратуры, средства для компьютерного управления режимами напыления. Практическое применение комплекса в опытном производстве НИИПМ (г. Минск), позволяет сократить время на технологическую подготовку производства новых изделий, снизить затраты на материалы и газы, требуемые для проведения исследований, улучшить условия труда инженеров-технологов. Цикл работ, связанный с моделированием процесса плазменного напыления покрытий, отмечен Государственной премией Республики Беларусь в области науки и техники за 2000 г. и Премией Национальной академии наук Республики Беларусь за 2001 г.



Рис. 3. Структурная схема программного комплекса Plasma

Моделирование процессов термообработки

Разработанная комплексная математическая модель процессов термообработки базируется на положениях максимального учета при моделировании теплофизических и динамических процессов, определяющих протекание процесса и свойства изготавливаемых деталей (напряженно-деформированное состояние, распределение твердости, фазовый состав и др.). Кроме того, был принят принцип геометрического соответствия модели реальной детали, т. е. использование трехмерного моделирования [18].

Укрупненная логическая схема комплексного моделирования и состав разработанных моделей, которые учитывают все стадии процесса, сквозную передачу данных и взаимодействие с базой данных (БД) свойств материалов, показана на рис. 4. Разработанные модели реализованы в составе программного комплекса для моделирования и оптимизации процессов термообработки деталей ThermoSim [19], который создан с использованием самых современных технологий программирования, обработки и 3D-визуализации информации, технологий баз данных.

Как видно из рис. 4, комплекс состоит из трех основных модулей: препроцессора, процессора и постпроцессора. В задачи препроцессора входит подготовка входной информации для моделирования, а именно задание:

геометрии модели (импорт файлов обмена чертежными графическими данными, проверка замкнутости поверхностей, разбижка на конечные элементы (КЭ) по поверхности и объему с заданием количества элементов, проверка правильной ориентации нормалей к КЭ) (рис.5);

свойств материалов (загрузка из базы данных (БД) свойств материалов и термокинетических диаграмм (ТКД) и аппроксимация температурных зависимостей свойств);

начальных и граничных условий (температурных условий (начальное значение температуры узлов, значения температур узлов и их графические зависимости, среды охлаждения)), механических условий (перемещение узлов);

условий процесса термообработки (общего количества инкрементов, номера периодически сохраняемого инкремента, общего времени процесса);
 запуск расчета (проверка правильности построения КЭ модели, визуализация хода расчета (мониторинг) и сообщение об ошибках).



Рис. 4. Укрупненная логическая схема комплексной математической и компьютерной модели процессов термообработки

Программные модули, которые входят в блок процессора, выполняют функции математических расчетов полей температур, деформаций, напряжений и твердости. Расчет полей температур осуществляется путем решения уравнения теплопроводности в соответствии с начальными, задаваемыми в объеме, и граничными, задаваемыми на поверхности, значениями узловых температур, плотностью, коэффициентами теплоемкости, теплопроводности материала, теплообмена с окружающей средой и временем охлаждения.

Напряженно-деформированное состояние определяется на основе решения упруго-пластической задачи и полученных полей температур, теплофизических свойств определенных фаз (аустенит, феррит, карбид и мартенсита). Твердость, температуры начала и конца фазовых превращений и процентный состав фаз могут быть определены либо из ТКД, либо методом аппроксимации значений с учетом химического состава и скорости охлаждения. Межфазные свойства предполагают задание значения теплоты (энергии), выделяемой или поглощаемой при фазовом переходе (для учета влияния теплового эффекта при фазовом переходе).

В задачи постпроцессора входит обработка выходной информации процессора, а именно, вывод и обработка результатов моделирования (распределение температур, деформаций, напряжений и твердости), т. е. построение графических зависимостей указанных выше величин и наглядное распределение их значений по поверхности и в сечении модели детали.

Отличительной особенностью разрабатываемых моделей является учет объемной геометрии деталей (3D-моделирование), а также фазовых превращений и релаксации напряжений за счет пластических деформаций. Описание распределения температур в нагреваемой или охлаждаемой детали основывается на решении с помощью метода конечных элементов (МКЭ) нестационарного уравнения теплопроводности для трехмерного случая. При этом в отличие от известных разработок в модели учитываются влияние теплового эффекта, получаемого при фазовом превращении (условие присутствия внутренних источников тепла), зависимость свойств

материалов от температуры и фазового состава, т. е. учитывается нелинейность свойств материала.

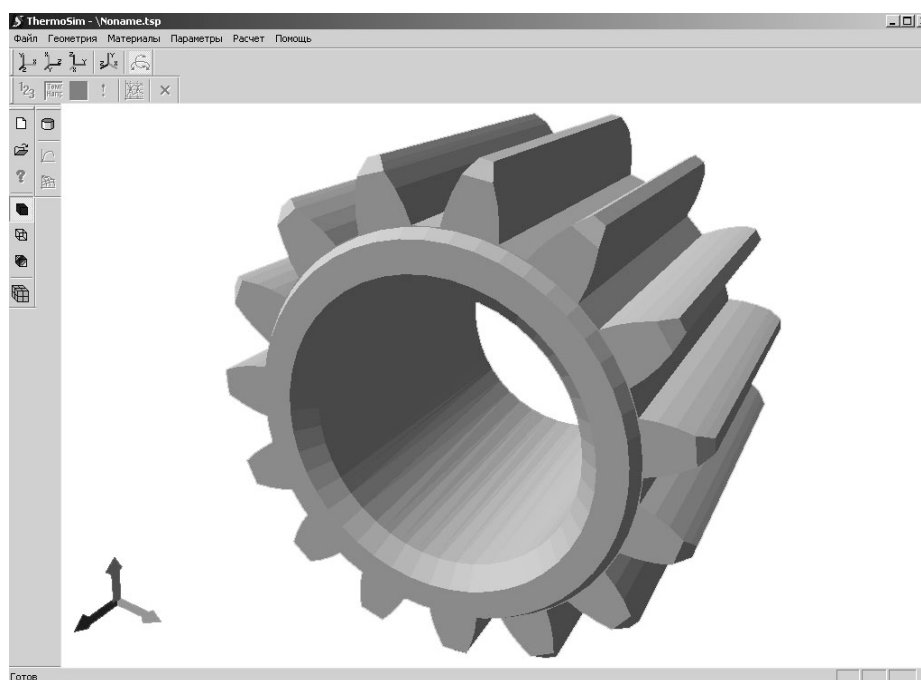


Рис. 5. Рабочее поле программного комплекса ThermoSim

В настоящее время проводятся опытные испытания и верификация моделей в условиях Центральной заводской лаборатории управления главного металлурга РУП "МАЗ". Планируемые сроки внедрения первой очереди разрабатываемого программного комплекса в производство на МАЗ — I квартал 2004 г. Применение разработки обеспечит сквозную автоматизацию, сокращение затрат времени и материальных средств на проектирование и технологическую подготовку деталей, подвергаемых термообработке.

Перспективы дальнейшего развития методов компьютерного моделирования технологических процессов

Дальнейшее развитие методов компьютерного моделирования технологических процессов и новых разработок лаборатории будет идти в следующих направлениях:

переход к трехмерным системам компьютерного проектирования и моделирования, что обеспечивает работу разработчиков с более реалистичными моделями, повышает производительность и качество их работы;

повышение быстродействия программных средств, реализующих моделирующие системы, за счет применения более эффективных алгоритмов решения математических задач и сложных геометрических преобразований;

дальнейшее расширение и совершенствование баз данных свойств материалов, от качества которых во многом зависит возможность применения и точность результатов моделирования;

"интеллектуализация" моделирующих систем за счет включения в их состав экспертных систем и других элементов систем искусственного интеллекта.

Последнее направление находится в настоящее время в стадии интенсивной разработки, в частности, применительно к процессам плазменного напыления и термообработки [20].

COMPUTER SIMULATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESSES

S.P. KUNDAS, B.A. TONKONOGOV, T.A. KASHKO

Abstract

The article is devoted to the developments of authors in the field of technological processes computer simulation and especially ultrasonic flattening, plasma spraying and heat treatment. The proposed conception of integrate simulation is considered. It is based on comprehensive description of physical processes influencing on quality of produced parts, imitation approach and application of expert systems elements. The developed mathematical models, software and further developments perspective are discussed.

Литература

1. Кундас С.П., Кашко Т.А. Компьютерное моделирование технологических систем: Учеб. пособ. в 2 ч. Ч 1. Мн.: БГУИР, 2002. 164 с.
2. Кундас С.П., Вышинский Н.В., Тявловский М.Д. Ультразвуковое плющение лент из тугоплавких металлов, применяемых в электронной технике и приборостроении / Под ред. акад. НАН Беларуси А.П.Достанко. Мн.: Бестпринт, 2001. 296 с.
3. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. В 2-х т. Т. 1 / С.П. Кундас, В.Л. Ланин, М.Д. Тявловский, А.П.Достанко / Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. Мн.: Бестпринт, 2002. 401 с.
4. Процессы плазменного напыления покрытий: теория и практика / А. Ф. Ильющенко, С. П. Кундас, А. П. Достанко и др. / Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А. П. Достанко, П. А. Витязя. Мн.: Армита, 1999. 544 с.
5. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф.Ильющенко, В.А.Оковитый, С.П.Кундас, Б.Форманек / Под ред. А.Ф.Ильющенко. Мн.: Бестпринт, 2002. 48 с.
6. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий / С. П.Кундас, А. П.Достанко, А. Ф.Ильющенко и др. Мн.: Бестпринт, 1998. 212 с.
7. Кундас С. П. Концепция комплексного имитационного моделирования процесса плазменного напыления покрытий // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.- тэхн. навук . 1997. № 1. С. 47 - 55.
8. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3-х т. Т.1./ А.П. Достанко, С.П. Кундас, С.В.Бордусов и др. / Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. Мн.: ФУАинформ, 2000. 424 с.
9. Кундас С.П., Фастовец Л.В. Компьютерное моделирование теплофизических процессов при ультразвуковом плющении лент с применением метода конечных элементов // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.- тэхн. навук. 1998. № 1. С.56–63.
10. Kundas S. Simulation and study of ultrasonic winding of flat fire spirals from refractory materials // Journal of advanced materials. 2000.Vol. 32, №2. P. 17-25.
11. Колтович В.А., Кундас С.П., Тявловский М.Д. Модель колебательной системы ультразвуковых технологических установок // Изв. Белорус. инж. акад. 1997. № 1(3)/3. С. 170–175.
12. Kundas S., Gurevich V., Pyuschenko A., Okovity V. Simulation and experimental studies of particles interaction with plasma jet in vacuum plasma spraying processes // Journal of advanced materials. 2000. Vol. 32, №3. P.3-11.
13. Громыко Г.Ф., Заяц Г.М., Ильющенко А.Ф., Кундас С.П. Моделирование растекания и затвердевания частицы при плазменном напылении // Порошковая металлургия. 1999. Вып. 22. С.101-107.
14. Program facilities for integrated simulation of coating plasma spraying / S. Kundas, V. Gurevich, S. Levashkevich, I. Smurov, M. Ignatiev // Proc. of III Intern. Conf. "Plasma Physics and Plasma Technology". Vol. 2. Minsk, 2000. P. 612-615.
15. 3D-simulation of residual stresses in the plasma sprayed coating /S.Kundas, V. Hurevich, T. Kashko, E. Lugscheider, G. Von Haun, A. Pyschenko // Proceeding of the 15 Intern. Plansee Seminar, Vol.3. Reutte: Austria. 2001. P.360-374.
16. Nickel, T. Kashko, S. Kundas, E. Lugscheider. The Application of a Homogenized Material Model in the FEM-Simulation of the Atmospheric Plasma Spraying Coating Formation //Proceedings of ASTC-2003 Conference. P. 119-126.

17. *Kundas S., Ilyshenko A.* Computer simulation and control of plasma spraying processes // *Materials and Manufacturing Processes*. 2002. Vol.17, N1. P. 85-96.
18. *Б.А.Тонконогов, И.А.Гишкелюк, Я.С.Левашкевич, А.В.Лемзиков, С.П.Кундас.* Компьютерное моделирование процессов термообработки металлических деталей // *Изв. Белорус. инж. акад.* 2002. №1(13)/2. С.155–158.
19. *Кундас С.П., Тонконогов Б.А., Лемзиков А.В. и др.* Программный комплекс для моделирования процесса закалки деталей машиностроения // *Грузовик*. 2003. №4. С.29-31.
20. *Kundas S., Levashkevich Y., Ilyushenko A.* Hybrid Expert Systems Implementation for the Research and Optimization of Coating Plasma Spraying Processes // *Proc. of IV International Conference "Plasma Physics and Plasma Technology"*. Minsk, Belarus, 2003. P.591 - 594.