

УДК 621.983.44:621.771.011

С.Н. СМАЛЬ

Государственная акционерная холдинговая компания «Артем», Киев, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОГО ОБЖАТИЯ ПОЛОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ

Разработана математическая модель ротационного обжатия полой цилиндрической заготовки, позволяющая осуществлять инженерный анализ и конструкторско-технологическое проектирование процесса с применением интегрированных компьютерных технологий. Моделирование процесса объёмной пластической деформации заготовки выполнено с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Оптимизация параметров моделирования состояла в принятии геометрических допущений и упрощений в полноразмерную модель, а также в выборе оптимального количества элементов её разбиения. Предложен численный алгоритм решения поставленной задачи с учетом полного цикла изготовления детали обжатием. Смоделирован процесс ротационного обжатия и произведены расчеты при различных параметрах. Выполнен анализ результатов моделирования и предложены параметры осуществления технологического процесса для детали типа «стакан».

Ключевые слова: корпусная деталь, моделирование, метод конечных элементов, ротационное обжатие, конструкторско-технологическое проектирование, технологические параметры, напряжения, деформации.

Введение

В условиях динамично изменяющегося спроса рынка и острой конкуренции основным фактором успеха предприятия является уменьшение времени этапов модернизации или создания нового изделия. Это возможно путем сокращения сроков всех этапов жизненного цикла изделия: проектирования, технологической подготовки и производства, а также его испытания и сертификации. Создание авиационно-космической техники сопровождается проектированием и изготовлением деталей, сборочных единиц, агрегатов большой сложности, высокой точности и трудоемкости. Такая категория изделий требует существенного времени на выполнение проектных работ и технологическую подготовку их производства. В результате трудоемкость конструкторско-технологической подготовки авиационно-космической техники может превышать 70% от общей. Одним из признанных в мировой практике способов повышения эффективности работы предприятия является широкое применение информационных технологий.

Формулирование проблемы в общем виде

На высокотехнологичных производствах, которыми являются предприятия авиационно-космической отрасли, в настоящий период широко используют различные CAD/CAM/CAE – системы при

выполнении конструкторско-технологических работ. Они позволяют повысить качество и сократить сроки их выполнения. Однако существенное сокращение сроков подготовки производства возможно путем параллельного выполнения конструкторско-технологических работ благодаря применению информационных технологий. В этом случае на стадии проектных работ использование интегрированных CAD/CAM/CAE/PDM систем становится главным фактором сокращения сроков. Исходя из вышесказанного можно отметить, что обеспечение снижения сроков подготовки производства изделия является общей актуальной научно-технической проблемой современного производства.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время имеются большое количество как универсальных, так и специализированных интегрированных CAD/CAE-систем для исследований и решения практических конструкторско-технологических задач по проектированию, инженерному анализу и подготовке производства [1, 2]. Эти системы позволяют выполнять проектирование и моделировать изготовление деталей, изделий и процессов. Как результат резко сокращаются количество экспериментальных исследований, доработок, материальных затрат, а также сроки подготовки производства при разработке новых изделий.

Одна из многочисленных составляющих конст-

рукторско-технологических работ связана с инженерным анализом получения сложных корпусных деталей, с целью обеспечения конструкции рациональной формы и оптимальных технологических параметров их изготовления. Моделирование процесса изготовления деталей с использованием интегрированных систем типа ANSYS или специальных систем типа QForm (Россия), DEFORM (США) позволяет осуществить инженерный анализ за кратчайшие сроки.

За последние годы проведен большой объем работ по моделированию различных процессов изготовления деталей и сложных изделий. Проанализируем некоторые вопросы моделирования задач обработки металлов давлением (ОМД) и конкретно рассмотрим метод давяльной обработки инструментом с локальной пластической деформацией, а именно ротационное обжатие (вытяжку). Этот метод позволяет получать ответственные осесимметричные детали с высокими механическими свойствами и заданной микроструктурой, что требуется иметь для корпусных деталей авиационно-космической техники. В результате ротационного обжатия можно выполнить утонение толщины стенки исходной заготовки и получить необходимую длину детали или местную конфигурацию формы поверхности. Хотя метод известен с начала прошлого века, первые теоретические и экспериментальные исследования произведены только в 60-х годах.

В работах [3, 4, 5] систематизированы и обобщены результаты по изготовлению осесимметричных деталей различными схемами формообразования путем локального пластического деформирования. Необходимо отметить отсутствие единой терминологии для процессов давяльной обработки. Учитывая основные определения и термины существующего стандарта [6], в настоящей работе для рассматриваемой схемы используется определение процесса как ротационное обжатие. Позднее в работах [7, 8, 9] уже появляются теоретические основы разработки математических моделей. В работе [10] авторами сделана попытка моделирования процесса ротационного обжатия. Однако расчеты выполнялись только для составляющих полноразмерной модели в виде сектора 90 градусов с граничными условиями при наличии одного инструмента-ролика. Интересный анализ кинематики течения и напряженно-деформированного состояния при ротационном обжатии (в статье используется термин вытяжки) проведен в работе [11]. Авторами получены математические формулы для определения величин радиальных, осевых и тангенциальных составляющих сил вытяжки. Моделирование процесса по трехроlikовой схеме с разделением очага деформации в работе не рассматривалось.

Постановка задачи исследования

Для разработки технологических процессов получения деталей методами локальной пластической деформации на токарно-давяльных станках требуется решить большое количество сложных теоретических и экспериментальных задач. Полный комплекс разработки включает значительное количество экспериментальных работ [12] и большие финансовые затраты на их выполнение, а также занимает существенный промежуток времени на подготовку производства. Так, на выполнение экспериментальных работ по отработке технологии ротационного обжатия детали только одного типоразмера было затрачено более полугода. На стадии подготовки производства требуется оценить возможность ротационного обжатия с получением заданной толщины стенки из материала с конкретными механическими характеристиками без дефектов (трещин, наплывов).

Альтернативой сложному теоретическому анализу и дорогостоящему экспериментальному исследованию является использование компьютерного моделирования процессов объемного пластического деформирования с помощью МКЭ. Очевидно, что для нужд производства необходимы разработки новых алгоритмов численного решения задач, с помощью которых возможно их решение при конструкторско-технологическом проектировании.

Поэтому актуальной научной проблемой является разработка эффективных математических методов и алгоритмов численного решения задач моделирования процессов изготовления сложных деталей методами локальной пластической деформации.

Целью работы является разработка математической модели ротационного обжатия полой цилиндрической заготовки по трехроlikовой схеме и анализ результатов полноразмерного моделирования процесса.

Изложение основного материала

Сущность моделируемого процесса ротационного обжатия заключается в следующем - полая цилиндрическая заготовка с внутренней формой и диаметрами, равными диаметрам готовой детали плотно надевается на оправку, которая закрепляется в токарно-давяльном станке. В качестве инструмента в станке применяют три ролика, которые могут вращаться вокруг своей оси, а также оси вращения X заготовки с оправкой и получают прямолинейное поступательное движение вдоль этой оси (рис. 1).

Предварительно заготовку получают объемной штамповкой и последующей механической обработкой.

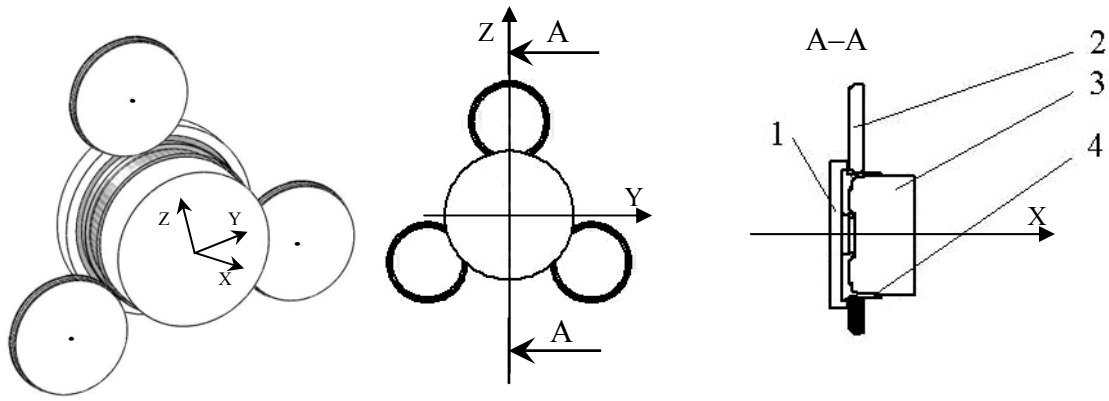


Рис. 1. Схема процесса ротационного обжатия:
1 – торцевая оправка, 2 – ролик, 3 – оправка, 4 – заготовка

кой для обеспечения необходимых размеров. Наружные размеры давящей оправки соответствуют внутренним размерам заготовки, которые остаются неизменными в процессе деформирования. Длина оправки должна быть больше длины обжатой заготовки. Ролики представляют инструмент цилиндрической формы, которые могут вращаться как вокруг своей оси, так и вокруг оси вращения оправки X. Рабочая часть роликов в сечении имеет углы и радиус закругления. Перед началом процесса обжатия их устанавливают в исходное для деформирования положение, а именно приближают к оси вращения X на величину подачи в канавку плоскости ZY. Ролики имеют локальную зону контакта с наружной цилиндрической поверхностью заготовки. При задании роликам одновременно двух перемещений: вращения вокруг продольной оси X заготовки и прямолинейного перемещения параллельно оси X, получаем суммарное движение по винтовой линии. В результате перемещения роликов происходит локальное пластическое деформирование слоя металла заготовки, которое равно смещению его вдоль продольной оси по сложной криволинейной траектории. При смещении слоя металла вдоль оси X уменьшается толщина стенки с одновременным увеличением длины заготовки. В этом и состоит сущность процесса **ротационного обжатия** полой цилиндрической заготовки.

1. Математическая модель ротационного обжатия

Рассмотрим общие математические соотношения и конкретные допущения для решения поставленной задачи. В рассматриваемой модели требуется учитывать нелинейный характер взаимосвязи между напряжениями и деформациями в пластической области. Поэтому в качестве неизвестных функций при построении математической модели

будем рассматривать скорости перемещения узловых точек или скорости деформаций. Разрешающие системы уравнений в МКЭ построены на основе вариационных принципов теории пластичности и упругости. В нашем случае общее уравнение приобретает следующий вид: $[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{F(t)\}$,

где $[M]$ – матрица масс;

$\{\ddot{U}\}$ – вектор узловых ускорений;

$[K]$ – матрица жесткости;

$\{U\}$ – вектор узловых перемещений;

$\{F(t)\}$ – вектор узловых усилий.

В итоге математическая модель заменяется системой линейных алгебраических уравнений. Для решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) используем метод центральных разностей с прямыми итерациями, применяемый для лагранжевых сеток. Тип решателя СЛАУ – метод сопряженных градиентов. В данном методе скорость в узлах используется для расчета нового положения узлов на следующем шаге расчета. Таким образом, нелинейная динамическая задача разбивается на ряд линейных решений, рассматриваемых на дискретном временном интервале. В связи с этим для получения устойчивого решения важно выбрать шаг по времени, являющийся одним из контролируемых параметров. При определении шага по времени необходимо вычислить время одного полного оборота:

$$T = \sqrt{\frac{2\pi}{\omega_1}}, \text{ где } \omega_1 \text{ – скорость вращения инструмента}$$

вокруг оси неподвижной заготовки, рад/сек.

Тогда приращение шага по времени определяется следующим образом: $\Delta t = \frac{T}{N}$, где N – число моделируемых шагов.

Для вычисления приращения шага по времени необходимо задаться числом моделируемых шагов и вычислить время протекания процесса. Вопрос выбора шага по времени является ключевым, поскольку слишком большой временной шаг является источником погрешностей получаемого решения, а также приводит к неустойчивости численного решения и, как следствие, прекращению счета. Причина неустойчивости численного решения лежит в сильном искажении формы элементов. Слишком малый временной шаг приводит к неоправданному увеличению времени счета. Поэтому важно выбрать оптимальное значение временного шага, используя следующие рассуждения: максимальные перемещения любого узла модели не должны превышать $1/3$ длины грани элемента в пределах временного шага.

Другим немаловажным параметром управления решением является выбор критериев сходимости численного решения. В данной задаче использован критерий сходимости по скоростям деформаций и усилиям.

Решение 3D-задач объемного пластического деформирования с использованием полноразмерных моделей приводит к необходимости разбиения очага деформации на несколько сотен тысяч конечных элементов с автоматической перестройкой сетки на каждом шаге по времени. Это требует значительных ресурсов объемов памяти и быстродействия вычислительной техники. Метод МКЭ может быть эффективно реализован только с использованием современных ЭВМ, обладающих большой (более 1ГБ) оперативной памятью и быстродействием, а также тактовой частотой процессора не менее 3,0ГГц. Даже использование мощной вычислительной техники требует оптимизации параметров счета. Поэтому при разработке расчетной схемы были приняты следующие общие допущения и упрощения.

1. Поскольку жесткость технологического инструмента (роликов, оправок) намного выше жесткости заготовки и параметры НДС инструмента не исследовались, то оправки и ролики рассматривались как абсолютно жесткие тела, а заготовка – деформируемое пластическое тело.

2. При разработке полноразмерной модели заготовки были выполнены упрощения геометрии с целью сокращения времени счета задачи. Была исключена из расчетов зона фланцевой части, которая не подвергалась деформированию.

3. При моделировании кинематики движения использован принцип обращения движения. Детально подход к моделированию кинематики движения при ротационном обжатии описан ниже.

В реальном процессе заготовка вращается, а при моделировании рассматривали неподвижную заготовку и вращающийся вокруг нее технологиче-

ский инструмент. Моделирование вращающейся заготовки приводит к численным проблемам, которые связаны с особенностями самого метода конечных элементов. Это проблемы с обновлением положения узлов модели, базирующиеся на интегрировании скорости в дискретном интервале времени. Следствием этого является увеличение диаметра и соответственно объема заготовки. Другая проблема связана с проявлением тенденции проскальзывания заготовки за счет сил трения, нежели вращение. Источником проблемы является разреженный локализованный контакт между заготовкой и инструментом. Разреженный контакт возникает при грубой разбивке заготовки или грубом определении геометрии инструмента. Для устранения существующих проблем применен метод обращения движения. Это не меняет природу процесса деформирования, однако упрощает процесс моделирования и исключает проблемы связанные с особенностями метода конечных элементов.

Применяя метод обращения движения, необходимо задать два вращательных движения: абсолютное и переносное (рис. 2). Первое движение – это вращение инструмента вокруг собственной оси с окружной скоростью ω_1 , а второе – вращение инструмента вокруг оси неподвижной заготовки с окружной скоростью ω_2 .

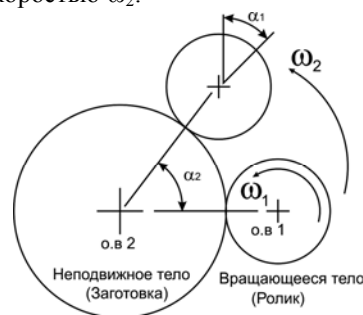


Рис. 2. Моделирование кинематики движения технологического инструмента (оправка внутри заготовки условно не показана)

4. Процесс формообразования представляет пластическое деформирование, поэтому можно применить модель материала, описываемую уравнениями пластического течения. Для модели заготовки помимо упругих характеристик (модуль упругости и коэффициент Пуассона) задавали уравнение пластического течения материала $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$, связывающего напряжения с деформациями при комнатной температуре $T = 20^\circ \text{C}$ и различных скоростях деформирования.

5. Следующим этапом разработки математической модели является учет контактного взаимодействия заготовки и технологического инструмента. В задачах рассмотрен контакт абсолютно жестких тел

(оправка и ролик) с деформируемым телом (заготовка). Выбрана встроенная в систему модель контактного взаимодействия Shear с учетом трения между контактируемыми телами. Величина коэффициента трения в расчетах принималась равной реальным условиям от 0,12 до 0,2.

Завершающим этапом моделирования является проведение комплексного физико-механического анализа после окончания расчета задачи при помощи модуля «Постпроцессор».

Для моделирования процесса ротационного обжатия исходные данные, технологические параметры и параметры математических моделей соответствовали реальным, которые представлены в табл. 1. Задачу решали в трехмерной постановке с использованием специализированной интегрированной системы DEFORM 3D. Полноразмерные объемные модели заготовки и инструментов разрабатывали с применением программ: Solid Works, CATIA или любой другой. Затем, используя формат передачи данных STL, их импортировали в модуль MACHINING системы DEFORM, где и создавался проект расчетной задачи. Разработка проекта предусматривала следующие действия для составления полной модели и последующих расчетов:

- разработку расчетной схемы процесса с принятием допущений и упрощений;
- перенос ранее разработанной полноразмерной геометрической объемной модели заготовки и инструментов в расчетный модуль,
- расчет геометрических и кинематических параметров модели процесса ротационного обжатия;
- ввод исходных данных, а также технологических параметров процесса и параметров математической модели в последовательности, изложенной в алгоритме (рис. 3).

Следует отметить сложность моделирования ротационного обжатия, которая заключалась в вычислении и вводе большого количества геометрических и технологических параметров. Их взаимосвязь друг с другом требовала возвратов к началу ввода в случаях обнаружения ошибок или необходимости изменения значений параметров с целью получения оптимальных результатов (см. алгоритм, рис. 3). В итоге происходило увеличение срока получения конечных результатов при решении одной задачи.

Проанализируем возвраты. Первый возврат возможен при наличии ошибок ввода после их контроля на завершающем этапе. После начала счета возможна проверка моделирования по отдельным параметрам, без остановки счета. Возвраты после этих двух этапов несущественно увеличивают общее время. Только возврат после завершения счета приводит к существенным временным потерям, равным компьютерному времени. Так, компьютерное

время решения одной задачи моделирования ротационного обжатия составляло не менее 50 часов, а некоторых задач с количеством элементов разбивки свыше 100,00 тыс. превышало 150 часов. При изменении параметров счета для последующего перехода счет задачи начинался с их ввода и выполнялся по алгоритму.

Создание КЭ модели заготовки типа «стакан» и разбивка с оптимальным размером сетки представляло сложную задачу. С одной стороны, незначительная исходная толщина стенки заготовки, равная 1,75 мм, требовала разбивки объема как можно с большим количеством элементов и малым их размером (рис. 4). С другой стороны, увеличение количества элементов свыше 300,00 тысяч приводило к неоправданно большому времени счета при решении одной задачи. Проведенные тестированные решения позволили оптимизировать величину количества элементов в интервале 117,00 – 230,00 тыс. для полноразмерной модели заготовки.

2. Анализ результатов моделирования ротационного обжатия

Учитывая, что моделирование выполнялось на полноразмерных моделях (рис. 5, а) результаты с большой степенью отражали реальный процесс. За один переход получена степень деформации 20%, которая была рассчитана из условия установки роликов на первоначальную глубину. Деформированная поверхность после моделирования ротационного обжатия не имела наплывов, разрывов или других дефектов. Качественная картина приведена на (рис. 5, б).

Анализ напряженно-деформированного состояния в процессе ротационного обжатия позволил выбрать рациональную форму и геометрические размеры исходной заготовки. Характер распределения эффективных напряжений по длине обрабатываемой заготовки является неравномерным (рис. 6, а) и имеет максимальные значения, начиная с 50% обработанной длины. На конце участка обработки (около 5%) не наблюдается достижение максимальных напряжений. В зоне контакта роликов максимальные напряжения носят локальный характер (рис. 6, б). Характер распределения эффективных деформаций по длине обрабатываемого участка является более равномерным и не достигает максимальных величин (рис. 6, в, г).

Моделирование позволило произвести оценку усилий, которые действуют на ролики в процессе обжатия. Общий характер усилий R_x на каждый ролик одинаков (рис. 7, а), однако величины максимальных и минимальных значений на каждом из трех роликов отличаются. Наиболее нагруженным

является первый ролик, и максимальные значения усилий P_x у него могут превышать 20 кН. Экспериментальные замеры усилия на роликах при ротации

онном обжатию на промышленном станке СРГ-1 подтвердили характер и величины, полученные при моделировании (рис. 7, б).

Таблица 1

Исходные данные и технологические параметры обжатию

№	Параметры моделирования	Значения показателя
1	Исходные данные заготовки и инструмента (полноразмерные модели)	
1.1	Геометрические параметры заготовки: форма и размеры (M1:1)	Согласно чертежа с начальным наружным диаметром 165мм и длиной обработки 53 мм
1.2	Геометрические параметры инструмента: – ролики – 3-и под углом 120 град. в ZY – оправка – одна по форме заготовки – торцевая оправка – одна	Цилиндрические диаметром 120мм и профилированной конической рабочей частью
1.3	Материал заготовки	Сталь 10 (AISI-1010, USA st)
1.4	Материал инструмента	Сталь X12M (Carbide)
1.5	Температура исходная заготовки и инструмента	20 град. Цельсия
1.6	Смазка и охлаждение	спец. эмульсия, интенсивное
1.7	Крепление заготовки и кинематика перемещений инструмента	схема см. на рис. 1
1.8	Координаты центров расположения роликов	ролик 1 – 0 град.; ролик 2 – +120 град. ролик 3 – –120 град. координаты X, Y, Z определены расчетами
1.9	Ось вращения заготовки и роликов направление вращения роликов	+X по часовой стрелке
2	Параметры технологического процесса и математической модели	
2.1	Окружная скорость вращения заготовки +оправки ω_2 (задается)	варьировалась от 200 до 450 об/мин
2.2	Окружная скорость вращения роликов ω_1 (вычисляется)	$\omega_1 = f(\omega_2, \text{Дзаг, Дрол})$
2.3	Поперечная подача ролика (глубина внедрения ролика по оси Z) в мм	варьировалась для перехода $S_z = 0,5 - 1,75$ мм
2.4	Продольная подача ролика (скорость перемещения вдоль оси X)	варьировалась $V_x = 0,5 - 5$ мм/об
2.5	Коэффициент трения «ролик-заготовка»	$\mu = 0,12$
2.6	Коэффициент трения «заготовка-оправка»	$\mu = 0,2$
2.7	Количество элементов, на которые разбивается полноразмерная модель	Варьировалось для оптимизации времени компьютерного счета $N = 70,0$ тыс – $300,0$ тыс элементов
2.8	Шаг счета и общее время счета (определяются расчетами для конкретных условий задачи)	$\Delta t = 0,005 - 0,1$ сек $T = 20,0 - 200$ сек
2.9	Количество шагов счета (расчетами)	$M_{step} = 300,0 - 30000,0$ шагов
2.10	Время одного оборота, количество оборотов для обработки и полное время обработки	Определялось расчетами по известным математическим зависимостям
2.11	Материал заготовки модели соответствует реальному	описывается моделью Мизеса как пластический
2.12	Материал инструмента (ролики, оправки) – соответствует реальному	представлен жесткими конечными элементами программы

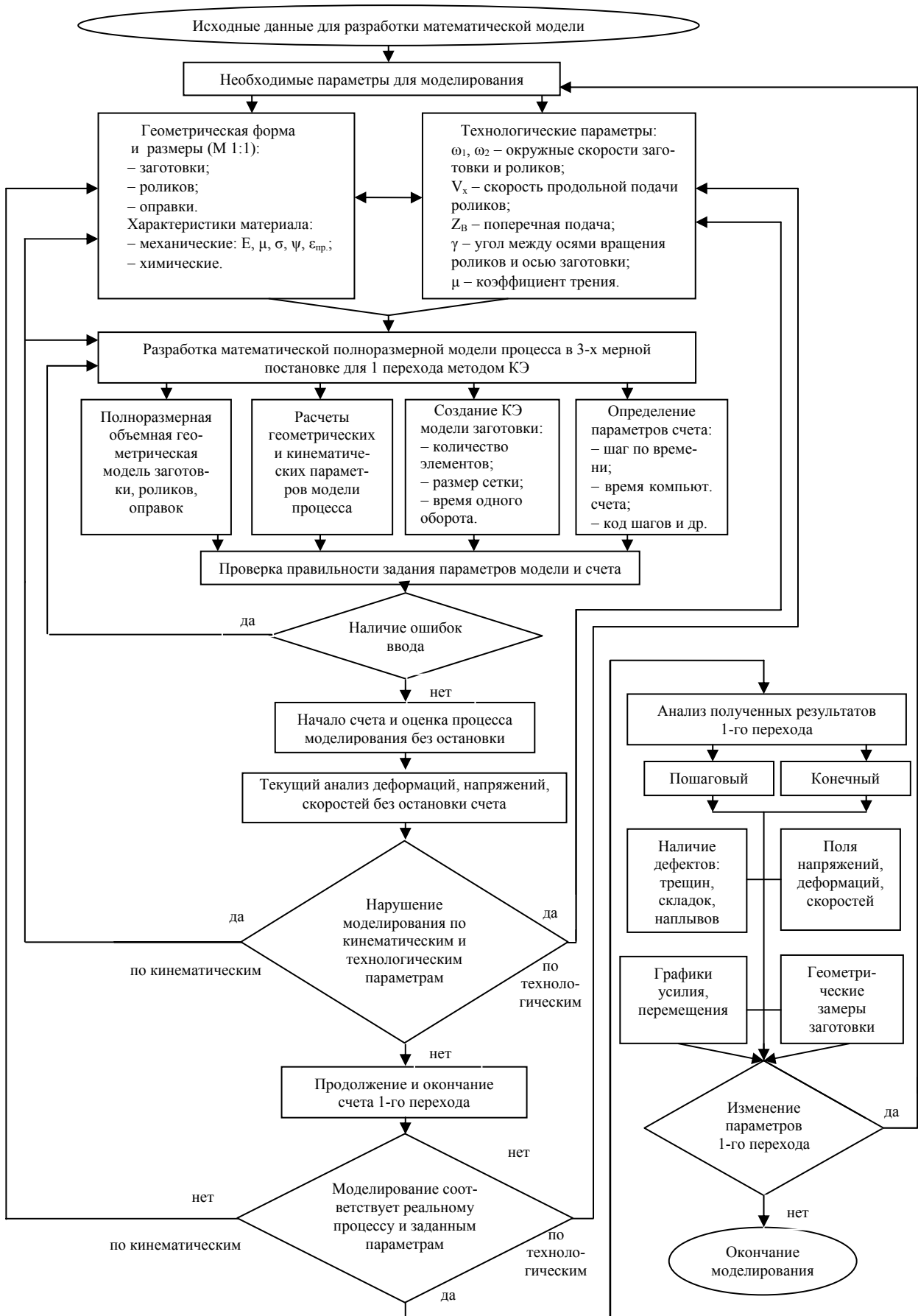


Рис. 3. Алгоритм численного моделирования процесса ротационного обжатия

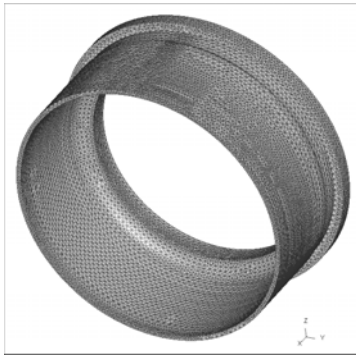


Рис. 4. Объёмная КЭ
полноразмерная модель
цилиндрической заготовки

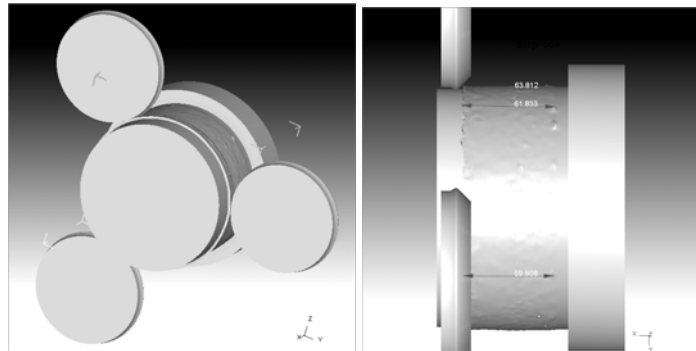
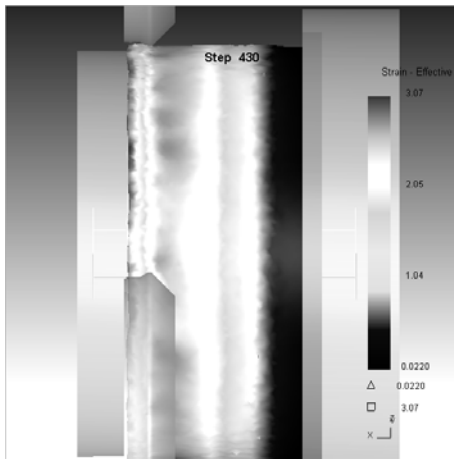
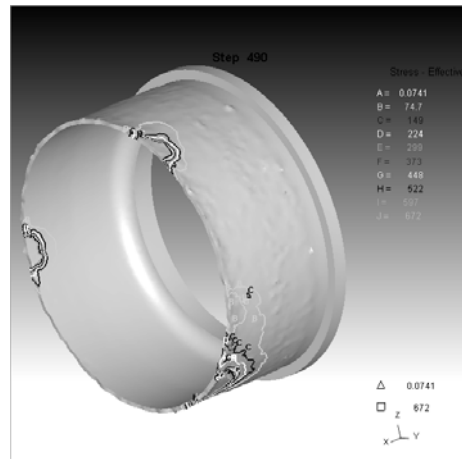


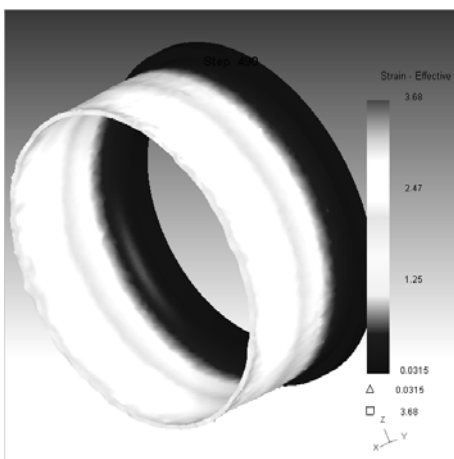
Рис. 5. Полноразмерная объёмная модель процесса
ротационного обжатия:
а – аксонометрия, б – вид сбоку после окончания процесса



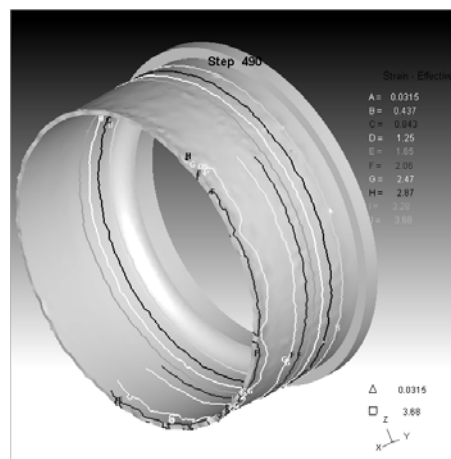
а



б



в



г

Рис. 6. Характер распределения в заготовке: а, б – напряжений; в, г – деформаций

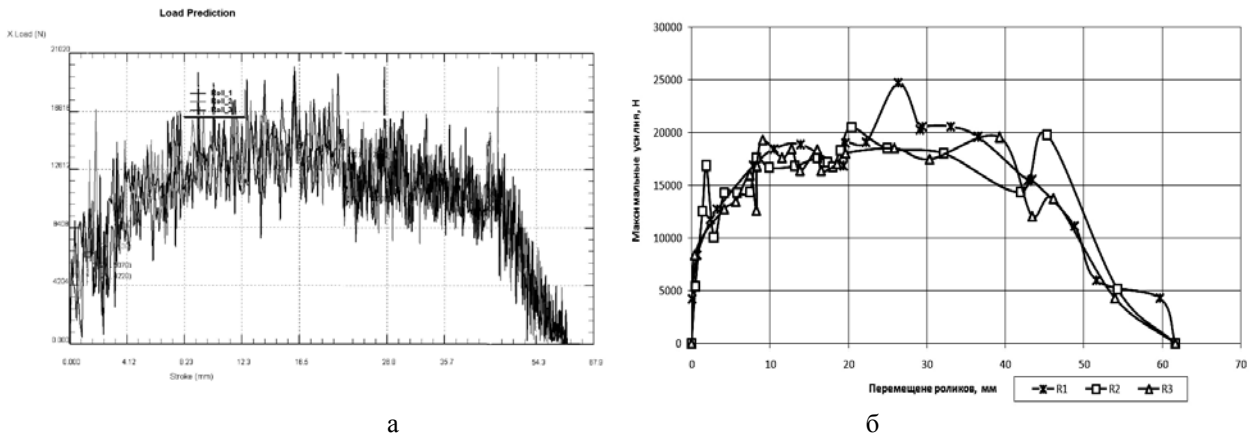


Рис. 7. Графики усилия P_x на 3-х роликах от длины обжатия: а – по результатам моделирования; б – экспериментальные, полученные на оборудовании

Отличия значений усилий, действующих на ролики, полученных при обжатии на станке от значений при моделировании не превышало 21%. Исследованиями также установлено влияние угла разворота роликов по отношению к оси вращения заготовки на усилие, которое действует на ролик. Приведенные графики (рис. 8) позволяют определять этот параметр в оптимальных интервалах, для первого ролика он составляет 4-6 градусов.

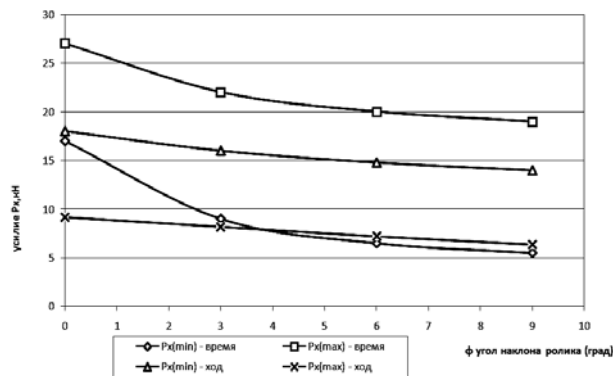


Рис. 8. Графики зависимости усилия на 1-м ролике от угла разворота при фиксированном времени (0,5с) или ходе (19 мм)

На основе анализа результатов моделирования процесса ротационного обжатия можно рекомендовать основные технологические параметры процесса для марки стали 10: скорость вращения заготовки и оправки в интервале $N=400 - 430$ об/мин, продольная подача роликов $V_x=0,2 - 0,5$ мм/об.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Разработана математическая модель ротационного обжатия для решения полноразмерных и объёмных 3D-задач, которая позволила отобразить реальные процессы пластического деформирования.

Определены параметры счета, позволяющие осуществлять его выполнение за приемлемое для производства время.

Решены задачи моделирования ротационного обжатия детали типа «стакан» и выполнен анализ результатов, который позволил сделать вывод о достоверности принятых допущений и упрощений для расчетной схемы.

Рекомендованы оптимальные значения основных технологических параметров ротационного обжатия для детали типа «стакан» из стали 10.

В конструкторско-технологическом проектировании технологических процессов моделирование изготовления сложных корпусных деталей позволяет снизить затраты и сократить сроки разработки на 50–70%.

На основе разработанной модели можно провести дальнейшие исследования по влиянию геометрических элементов рабочих роликов на качество обработанной поверхности и силовые параметры обжатия. Также представляет интерес моделирование структурных превращений в процессе ротационного обжатия.

Литература

1. Погребинский А. Сравнительный анализ CAD/CAM-систем / А. Погребинский, А. Павлов // САПР и графика. – 2000. – № 8. – С. 75-77.
2. Петров А.П. Практика применения CAE-систем при разработке технологических процессов обработки металлов давлением / А.П. Петров, В.И. Галкин, А.Р. Палтиевич // Технология машиностроения. – 2006. – № 8. – С. 73-76.
3. Гредитор М.А. Давильные работы и ротационное выдавливание / М.А. Гредитор. – М.: Машиностроение, 1971. – 239 с.
4. Давильно-обкатные работы в современном машиностроении / В.Г. Капорович, Н.Д. Барыкин, Л.Н. Ващук, М.П. Найденов, В.К. Удовенко. – К.: УкрНИИИТИ, 1971. – 178 с.

5. Могильный Н.И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках / Н.И. Могильный. – М.: Машиностроение, 1983. – 190 с.

6. ГОСТ 18970 -84. Обработка металлов давлением. Штампы. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 15830-75; введ. 01.07.85. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 46 с.

7. Математическое моделирование пластической деформации / Л.Е. Попов, Л.Я. Пудан, С.Н. Колупаева и др. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. – 184 с.

8. Кудюров Л.В. Математическое моделирование и исследование процессов ОМД: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.16 / Кудюров Лев Владимирович; Самара, 1998. – 23 с.

9. Міленін А.А. Розробка наукових основ та розвиток технологій тримірної пластичної формозмінення металів із застосуванням методів комп'ютерного моделювання: автореф. дис. ... д-ра

техн. наук: 05.03.05 / Міленін Андрій Анатольйович; Нац. металург. акад. України. – Дніпропетровськ, 2001. – 35 с.

10. Разработка математической модели изготовления осесимметричных изделий методом локального формообразования / Н.П. Барыкин, В.А. Плехов, В.К. Бердин, С.А. Шулепов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2004. – № 10. – С. 21-24.

11. Трегубов В.И. Силовые режимы ротационной вытяжки цилиндрических деталей на специализированном оборудовании / В.И. Трегубов, С.П. Яковлев, С.С. Яковлев // Кузнечно-штамповочное производство. – 2005. – № 1. – С. 17-22.

12. Опыт внедрения технологических процессов ротационной вытяжки цилиндрических деталей / Н.А. Макаровец, В.И. Трегубов, Е.А. Белов, С.П. Яковлев // Кузнечно-штамповочное производство. – 2002. – № 8. – С. 24-28.

Поступила в редакцию 9.01.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технологии производства летательных аппаратов М.Е. Тараненко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОТАЦІЙНОГО ОБТИСНЕННЯ ПОРОЖНИСТОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ЗАГОТОВКИ

С.М. Смаль

Розроблено математичну модель ротацийного обтиснення порожнистої циліндричної заготовки, що дозволяє здійснювати інженерний аналіз і конструкторсько-технологічне проектування процесу із застосуванням інтегрованих комп'ютерних технологій. Моделювання процесу об'ємної пластичної деформації заготовки виконано за допомогою методу кінцевих елементів (МКЕ). Оптимізація параметрів моделювання складалася в прийнятті геометричних допущень і спрощень у повнорозмірній моделі, а також виборі оптимальної кількості елементів її розбивки. Запропоновано чисельний алгоритм рішення поставленого завдання з урахуванням повного циклу виготовлення деталі обтисненням. Виконане моделювання процесу ротацийного обтиснення й зроблені розрахунки при різних параметрах. Виконано аналіз результатів моделювання й запропоновані параметри здійснення технологічного процесу для деталі типу «склянка».

Ключові слова: корпусна деталь, моделювання, метод кінцевих елементів, ротацийне обтиснення, конструкторсько-технологічне проектування, технологічні параметри, напруги, деформації.

MATHEMATICAL MODELING OF HOLLOW CYLINDER-SHAPED BLANK ROTARY SWAGING PROCESS

S.N. Smal

A mathematical model for rotary swaging of a hollow cylinder-shaped blank has been developed, which allows to perform engineering analysis as well as engineering and process design of the process with the help of integrated computer technologies. Blank volume plastic yield deformation modeling has been made with the help of finite elements method (FEM). Optimization of the modeling parameters involved assumption of geometrical suppositions and reductions in a full-scale model, as well as selecting an optimal number of elements for its layout. A numerical algorithm for solving the set problem was suggested with the account of the complete blank rotary swaging cycle. Rotary swaging process was modeled and calculations at different parameters were made. The modeling results were analyzed and the process parameters for “glass” type part were suggested.

Key words: box-type work piece, modeling, finite elements method, rotary swaging, engineering and process design, process parameters, stresses, deformations.

Смаль Станіслав Николаевич – президент компанії, Государственная акционерная холдинговая компания «Артем», Киев, Україна, e-mail: info@artem.ua.