

УДК 621.983.44:621.771.011.

Смаль С. Н.
Данченко В. Г.**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ РИФТОВ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛОЙ ЗАГОТОВКИ**

Создание новой техники или модернизация существующей сопряжено с большими объемами работ и финансовыми затратами по технической подготовке её производства. Наличие в современной технике сложных деталей, применение материалов со свойствами, отличающимися от широко используемых, а также высокие требования к их качеству увеличивают количество работ по конструкторско-технологическому проектированию. Выполнение этих работ традиционными методами подготовки приводит к еще большим затратам и резкому увеличению подготовительных сроков. Альтернативой сложному теоретическому анализу и дорогостоящим экспериментальным работам является использование компьютерного моделирования процессов изготовления деталей. В этом случае использование интегрированных CAD / CAM / CAE / PDM систем для выполнения проектных работ становится главным фактором сокращения сроков при разработке новых технологических процессов.

Вопросами моделирования процессов изготовления деталей и в частности получаемых ОМД методами локальной пластической деформации занимаются с момента появления компьютерных интегрированных систем. Сам метод давяльной обработки получает широкое распространение только в 60-х годах, когда появляются специализированное оборудование и результаты теоретических и экспериментальных исследований. Так в работах [1–3] систематизирован и обобщен опыт по изготовлению осесимметричных деталей различными схемами формообразования. Однако в них приводятся только общие рекомендации по технологическим параметрам, которые основаны на простых экспериментальных данных, а использование их при проектировании новой сложной детали не всегда отражает реальную картину формообразования. Позднее в трудах [4, 5] и других уже появляются теоретические основы, касающиеся разработки математических моделей. В работе [6] авторами обобщены результаты моделирования некоторых процессов ОМД, таких как гибка, прессование, обкатка. Однако моделирование процесса ротационной формовки методом локальной пластической деформации в имеющихся публикациях не рассматривалось. Очевидно, что требуется дальнейшее продолжение работ в направлении разработки моделей и новых алгоритмов численного решения задач, которые возникают при конструкторско-технологическом проектировании в процессе технологической подготовки производства. Поэтому актуальной научной проблемой является разработка эффективных математических методов и алгоритмов численного решения задач моделирования процессов изготовления сложных деталей ротационным пластическим деформированием.

Целью работы является разработка математической модели ротационной формовки рифтов на цилиндрической поверхности полой заготовки и анализ результатов полноразмерного моделирования процесса.

Сущность моделируемого процесса ротационной формовки заключается в следующем. Полая цилиндрическая заготовка 2 с формой и диаметрами, которые получены на предыдущих операциях (рис. 1), закрепляется в токарно-давяльном станке и получает вращение. Внутри заготовки располагается внутренняя оправка 3, ось вращения которой смещена по отношению к оси вращения заготовки 2. Оправка имеет профилированную форму, соответствующую геометрии изготавливаемой детали. Она контактирует с заготовкой по внутренней поверхности и ее ось неподвижна относительно этого диаметра. Снаружи расположен профилированный ролик 1, контактирующий с наружной поверхностью заготовки 2. Геометрия ролика и оправки соответствуют геометрии изготавливаемой детали и показана на рис. 1, а, б. В процессе деформирования ролику 1 сообщается равномерное поступательное движение

со скоростью поперечной подачи V_z . За счет сил трения, возникающих при контакте вращающейся заготовки с технологическим инструментом, ролик и оправка совершают вращательное движение вокруг собственных осей. В результате получаем процесс ротационной формовки, представляющий собой последовательное и непрерывное локальное деформирование цилиндрической поверхности заготовки 2 совместным воздействием ролика 1 и оправки 3 (рис. 1).

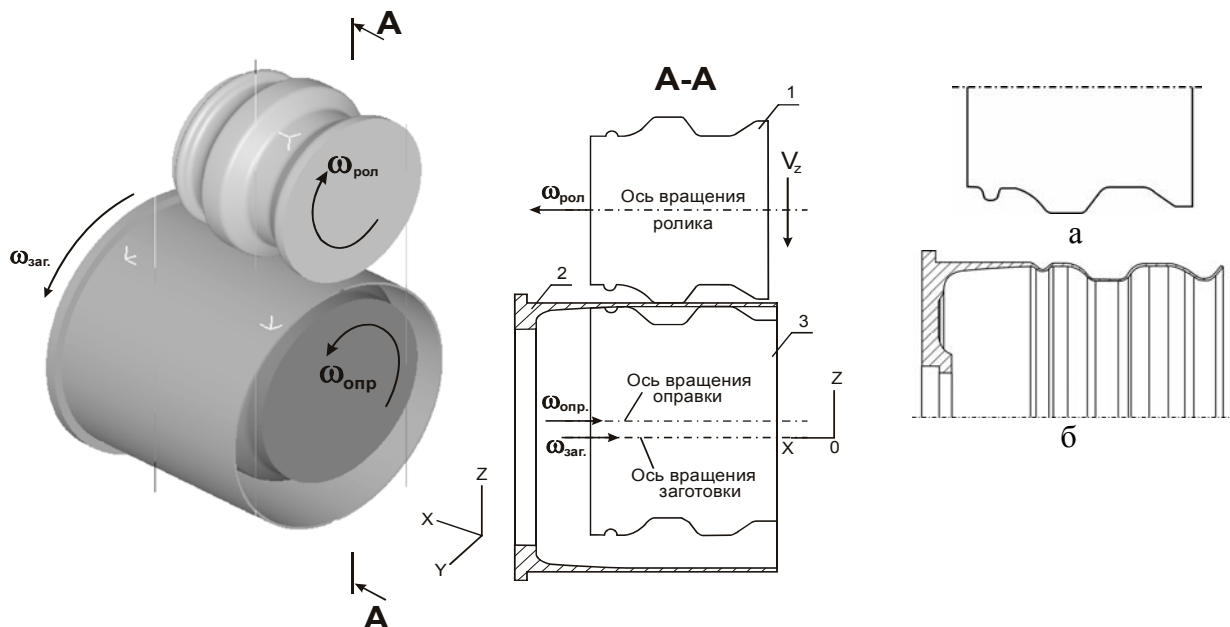


Рис. 1. Схема процесса ротационной формовки с образованием рифтов на цилиндрической поверхности:

1 – ролик; 2 – заготовка; 3 – внутренняя оправка; а – геометрия ролика для формовки; б – геометрия готовой детали

Рабочая часть ролика и оправки в сечении имеет размеры, углы и радиусы закругления, соответствующие готовой детали. Перед началом процесса деформирования оправку 3 заводят во внутрь заготовки 2 и устанавливают в исходное положение, обеспечивая контакт по внутреннему диаметру. Затем устанавливают ролик 1 по отношению к внутренней оправке. При вращении заготовки осуществляют поперечную подачу ролика 1 на расчетную величину, в результате чего происходит пластическая деформация цилиндрической поверхности с образованием рифтов.

Математическая модель ротационной формовки разрабатывалась с использованием общих математических соотношений и допущений, которые базировались на основных законах теории пластичности. В рассматриваемой задаче 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. Системы уравнений в методе конечных элементов (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 конечном итоге математическую модель можно заменить системой линейных алгебраических уравнений. Для решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) будем использовать метод центральных разностей, который применяется для лагранжевых сеток. Используем тип решателя для уравнений – метод сопряженных градиентов. При решении

выбран прямой итерационный метод. 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. По результатам выполненного анализа можно выбрать оптимальное значение временного шага, используя следующие рекомендации: максимальные перемещения любого узла модели не должны превышать 1/3 длины грани элемента в пределах временного шага. Также 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 пластического деформирования для полноразмерных моделей приводит к необходимости разбиения очага деформации на несколько сотен тысяч конечных элементов с автоматической перестройкой сетки на каждом шаге по времени. Малые значения толщины цилиндрической заготовки до двух миллиметров также заставляют выполнять разбиение на более мелкие элементы, тем самым увеличивая их общее количество. Все это требует значительных ресурсов объемов памяти и быстродействия вычислительной техники. Метод МКЭ может быть эффективно реализован только с использованием современных ЭВМ, которые обладают большой (более 4 ГБ) оперативной памятью и быстродействием, а тактовой частотой процессора не менее 3,0 ГГц. Даже использование мощной вычислительной техники требует оптимизации параметров счета. Поэтому при разработке расчетной схемы были приняты следующие общие допущения и упрощения.

1. С целью упрощения описания кинематических движений процесс непрерывного пластического деформирования при ротационной формовке был разбит на две последовательных задачи: первая задача заключалась в моделировании предварительного внедрения ролика в заготовку со скоростью поперечной подачи, а вторая задача соответствовала вращательному движению ролика и оправки на один полный оборот инструмента, в результате которого и происходило образование рифта на цилиндрической поверхности.

2. Заготовка рассматривалась как деформируемое пластическое тело, а ролик и оправка – как абсолютно жесткие тела, и приняты эти допущения в случае, если жесткость технологического инструмента намного выше жесткости заготовки.

3. 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.

4. При моделировании кинематики движения использован принцип обращения движения. Этот принцип заключается в том, что в реальном процессе заготовка вращается, а при моделировании рассматривали неподвижную заготовку и вращающийся вокруг нее технологический инструмент (рис. 2). 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 и применен метод обращения движения. Он 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. Первое движение – это вращение инструмента вокруг собственной оси с окружной скоростью ω_1 , а второе – вращение инструмента вокруг неподвижной заготовки с окружной скоростью ω_2 . Детально подход к моделированию кинематики движения каждого перехода описан в алгоритме.

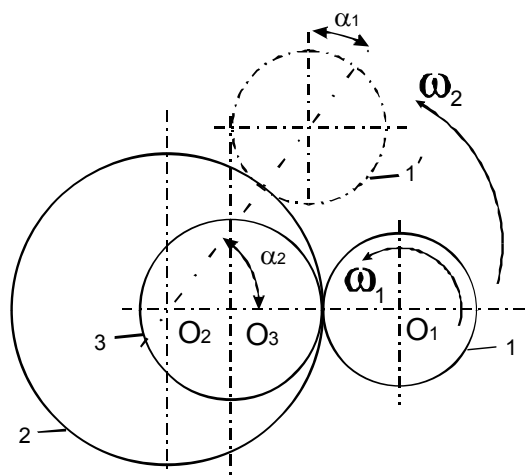


Рис. 2. Моделирование кинематики движения инструмента при ротационном деформировании:

1 – ролик (условно вращающийся со скоростью ω_1 и ω_2); 2 – заготовка (условно неподвижная); 3 – внутренняя оправка

5. В процессе формообразования имеет место пластическое деформирования, поэтому необходимо применять 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.

6. При разработке математической модели учитывалось контактное взаимодействие заготовки и технологического инструмента. В задаче 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. Коэффициент трения в расчетах принимался равным реальным условиям от 0,12 до 0,2.

Довольно сложной задачей при моделировании процесса ротационной формовки рифтов является определение или назначение технологических и конструктивных параметров, обеспечивающих получение готовой детали заданного качества. Такими параметрами являются: технологические – скорость поперечной подачи V_z и окружная скорость вращения заготовки $\omega_{заг}$ (при моделировании ω_2) и конструктивные – геометрическая форма и размеры рифтов. При постановке тестовой задачи выбор численных значений этих параметров осуществлялся по рекомендациям, приведенным в технической литературе. Завершающим этапом создания математической модели является разработка алгоритма моделирования процесса.

Для рассматриваемой задачи алгоритм ротационной формовки при разбивке процесса на два перехода представлен на рис. 3.

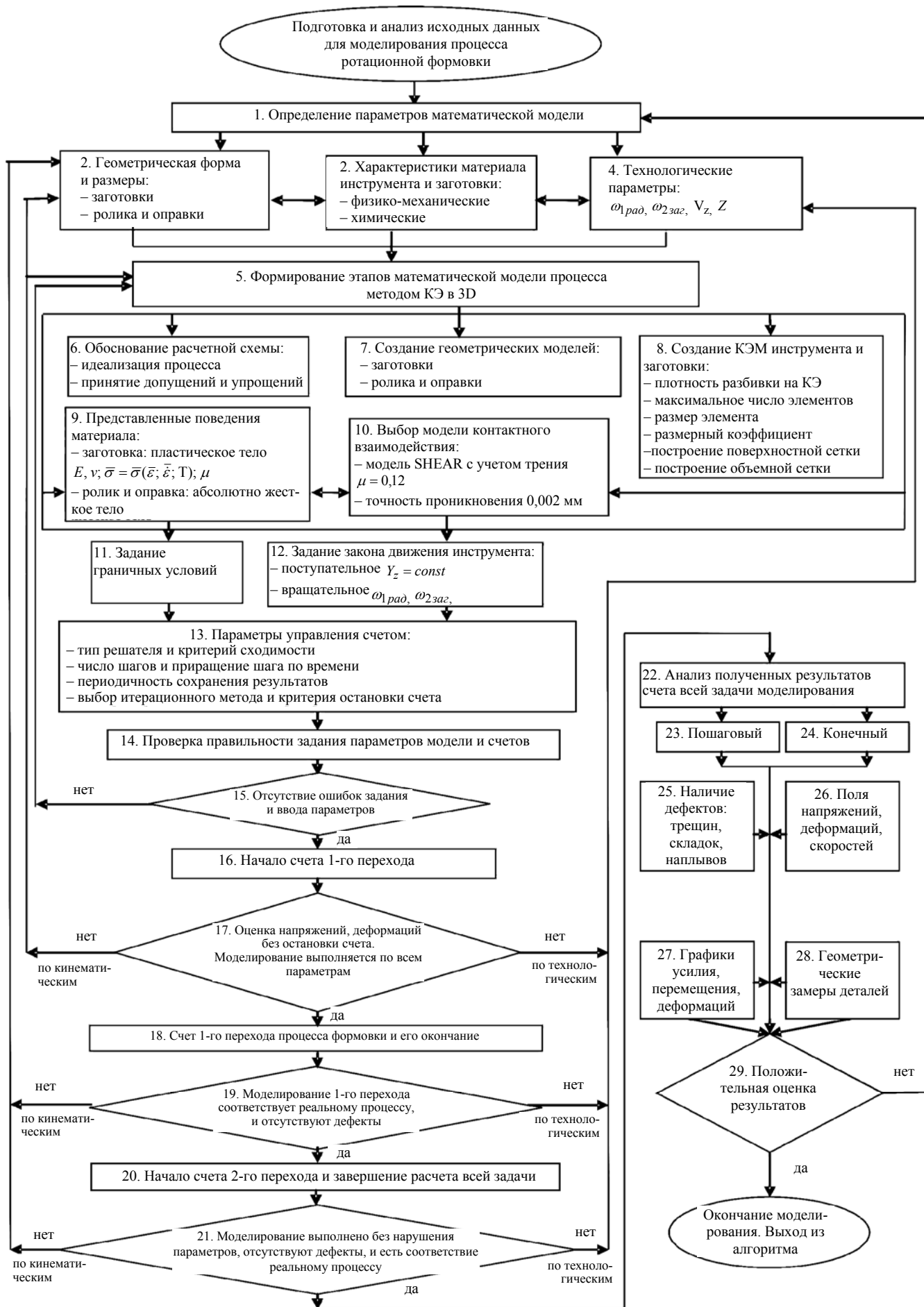


Рис. 3. Алгоритм моделирования процесса ротационной формовки

Задачи моделирования решали в трехмерной постановке с привлечением численного метода и разработанного алгоритма. Исходной заготовкой для ротационной формовки была заготовка с геометрическими размерами, полученными ротационным обжатием на предыдущем этапе. На основании этих данных, а также принятых допущений и упрощений, были разработаны трехмерные геометрические модели заготовки и технологического инструмента. Полноразмерные объемные модели заготовки и инструмента разрабатывали с применением программы CATIA.v5. Используя формат передачи данных STL, созданные геометрические модели импортировали в интегрированную систему Deform, в которой и проводили дальнейшее моделирование двух этапов задачи процесса ротационной формовки. Геометрия заготовки является основой для построения конечно-элементной модели, поскольку она определяет границы разбиваемой области. При создании конечно-элементной модели заготовки необходимо учитывать специфику решаемой задачи, а именно локальное контактное взаимодействие инструмента и заготовки в очаге деформирования. Локальный контакт в очаге деформирования приводит к образованию минимальной локализованной зоны с резким градиентом напряжений. В связи с этим необходимо иметь достаточно густую сетку на участке контакта инструмента с заготовкой. В общем случае размер конечного элемента является ключевым параметром, влияющим на точность получаемого результата, продолжительность расчета и потребные вычислительные мощности. Исходная геометрическая модель заготовки была разбита на 68883 тетраэдральных элементов, содержащих 21291 узла. Данный этап моделирования завершает процесс формирования разрешающих уравнений метода конечных элементов и позволяет перейти к вводу всех данных задачи и началу счета. Создание КЭ модели заготовки типа «стакан» с толщиной стенки менее 2-х мм и разбивка её 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 малыми размерами элементов. С другой – малые размеры элементов увеличивали их количество. В итоге увеличение количества элементов свыше 300,00 тысяч приводило к не оправданно большому времени счета при решении одной задачи. Так компьютерное время решения задачи моделирования ротационной формовки с количеством элементов 375,00 тысяч превышало 450 часов. Проведенные тестированные решения позволили оптимизировать величину количества элементов в интервале 117,00–230,00 тыс. для полноразмерной модели заготовки.

Для оценки разработанной математической модели было осуществлено моделирование ротационной формовки с исходными данными и параметрами технологического процесса, значения которых соответствовали реальному процессу и приведены ниже:

- геометрические формы, а также размеры заготовки и инструмента согласно рис. 1 (наружный диаметр $D_{заг} = 160$ мм);
- материал заготовки сталь 10 (AISI-1010), инструмента сталь X12M;
- окружная скорость вращения заготовки или при моделировании ролика с оправкой ω_2 – задавалась от 200 об/мин до 450 об/мин;
- окружная скорость вращения ролика и оправки $\omega_1 = f(\omega_2, D_{заг}, D_{рол})$ (вычисляется);
- поперечная подача ролика (глубина внедрения ролика по оси z) варьировалась для первого перехода $S_z = 0,5–1,75$ мм;
- количество элементов, на которые разбивается полноразмерная модель варьировалось для оптимизации времени счета в следующем интервале количества элементов $N = 70,0$ тыс–300,0 тыс;
- шаг счета при моделировании и общее время счета – $\Delta t = 0,005$;
- 0,1 сек; $T = 20,0–200$ сек.

Расчеты выполняли для полноразмерной модели в трехмерной постановке с использованием специализированной интегрированной системы DEFORM-3D. В расчетный модуль системы импортировали все данные и исходные параметры, где и создавали проект задачи. Разработка проекта предусматривала следующие действия при составлении полной модели:

- разработку расчетной схемы процесса с принятием допущений и упрощений;
- перенос ранее разработанной полноразмерной геометрической модели заготовки и инструментов в расчетный модуль,
- расчет геометрических и кинематических параметров модели процесса ротационной формовки;
- ввод исходных данных, а также технологических параметров процесса, параметров математической модели в последовательно изложенном алгоритме.

Следует отметить сложность моделирования ротационной формовки, которая заключалась в вычислении и вводе большого количества геометрических и технологических параметров.

Наличие взаимного влияния этих параметров увеличивало число вариаций и как результат срок решения одной задачи. После ввода всех параметров выполняется проверка на отсутствии ошибок и первый возврат возможен при их наличии уже на этом этапе. Начало счета первого перехода сопровождается проверкой моделирования по отдельным параметрам, без остановки счета. Возвраты после двух этапов (блок 15 и 17) не существенно увеличивают общее время. Только возврат после завершения счета второго перехода (блок 21) приводит к существенным временным потерям равным компьютерному времени всей задачи. В решаемой задаче компьютерное время для моделирования ротационной формовки было оптимизировано и составляло около 45 часов.

Современные интегрированные системы, применяемые для инженерного анализа, позволяют качественно и количественно проанализировать результат моделирования как в процессе его осуществления так и после завершения. Предварительный анализ выполнялся во время компьютерного счета (блок 17 в алгоритме). Здесь оценивались кинематические перемещения заготовки и инструмента, количественные значения напряжений, деформаций, температур. Все эти параметры давали ответ на соответствие моделирования реальному процессу. После завершения счета задачи интегрированная система позволяла получить следующую обширную информацию: о деформируемом состоянии материала и визуализации сетки заготовки; движении инструмента; о распределении расчетных параметров (напряжений, деформаций, скоростей деформаций и другие) в заготовке в виде линий или поверхностей равного уровня; графики изменения расчетных параметров (напряжений, деформаций, усилия на ролик). Визуальная оценка качества поверхности образованных рифтов позволяла сразу вносить коррективы в параметры процесса и геометрию элементов ролика и оправки. Было замечено, что задание технологических и конструктивных параметров формовки без учета напряженно-деформированного состояния, в дальнейшем приводило к нарушению процесса пластического деформирования и образованию дефектов: в виде разрывов, наплывов, смятий и недопустимых утонений. Моделирование позволило оптимизировать геометрические размеры и формы рифтов еще на этапе проектирования. Поэтапный анализ значений эквивалентных напряжений и деформаций в различных зонах (рис. 4) позволил предсказать наиболее опасное место, где происходило нарушение сплошности и разрыв материала. Этим местом был первый рифт от дна стакана с критическими значениями напряжений свыше 600 МПа (рис. 4, б). Именно в зоне первого рифта возникают максимальные деформации, которые и приводят к появлению разрушений в металле раньше, чем на других рифтах. Последовательная совместная оценка геометрии и НДС каждого рифта позволила рекомендовать их рациональную форму еще на стадии проектирования. Так для первого рифта получена оптимальная форма в сечении с радиусом 7,0 мм и углом в 28 градусов к цилиндрической образующей в сторону остальных рифтов.

По результатам моделирования построена зависимость максимальных эквивалентных напряжений и усилия от времени (рис. 5, а, б). Максимальные напряжения и усилия появляются в тот момент времени, когда в первом рифте наблюдаются максимальные пластические деформации, что и получило подтверждение в процессе моделирования.

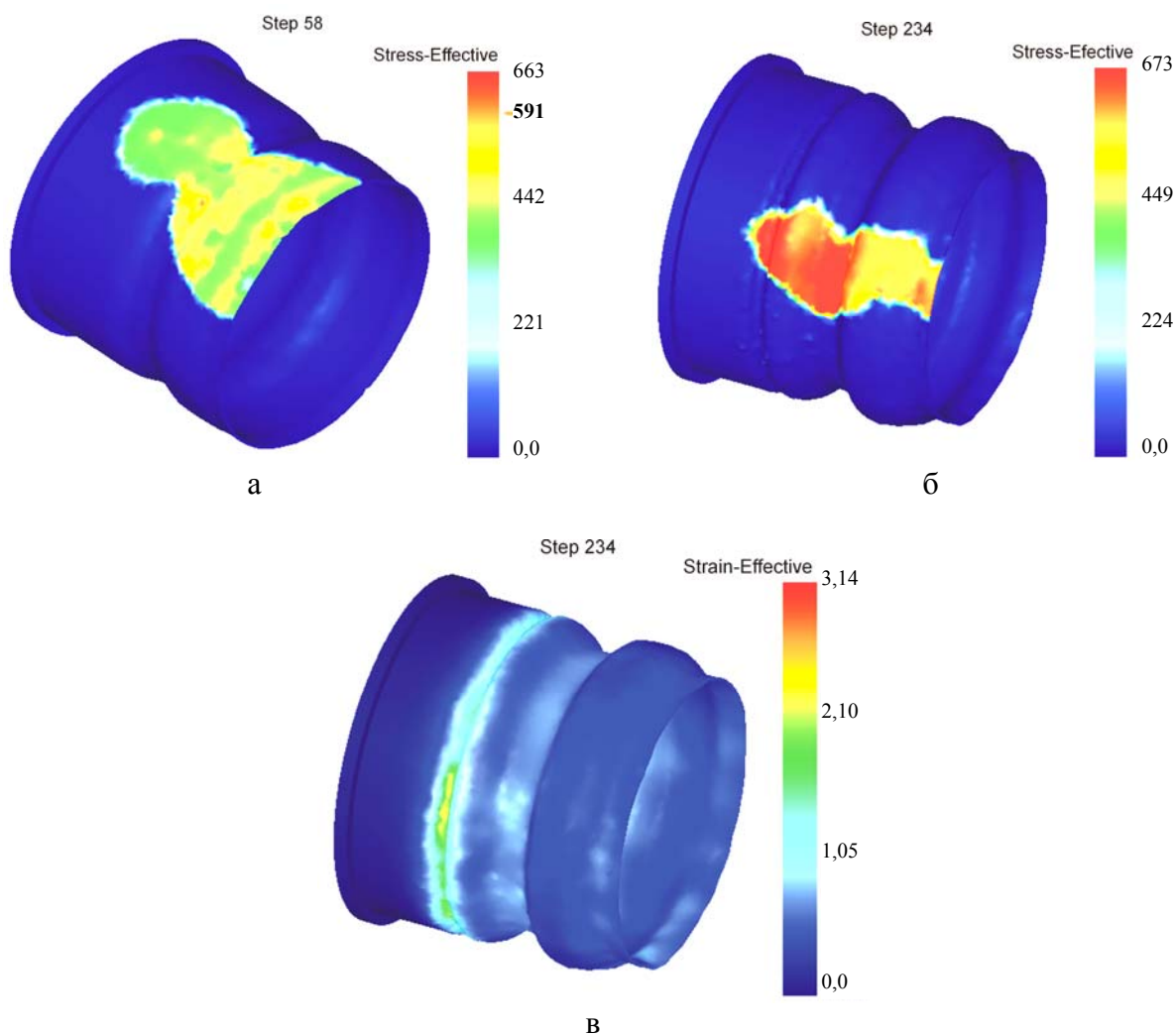


Рис. 4. Поле распределения эквивалентных напряжений и деформаций в заготовке: а – напряжения в начале; б – напряжения в конце; в – деформации в конце деформирования

Величина максимальных усилий возрастает плавно в течение времени пластического деформирования цилиндрической толщины стенки и образования рифтов до момента контакта с поверхностью внутренней оправки. При дальнейшей поперечной подаче происходит резкое возрастание усилия, что и показало моделирование после 100 сек. (рис. 5, б).

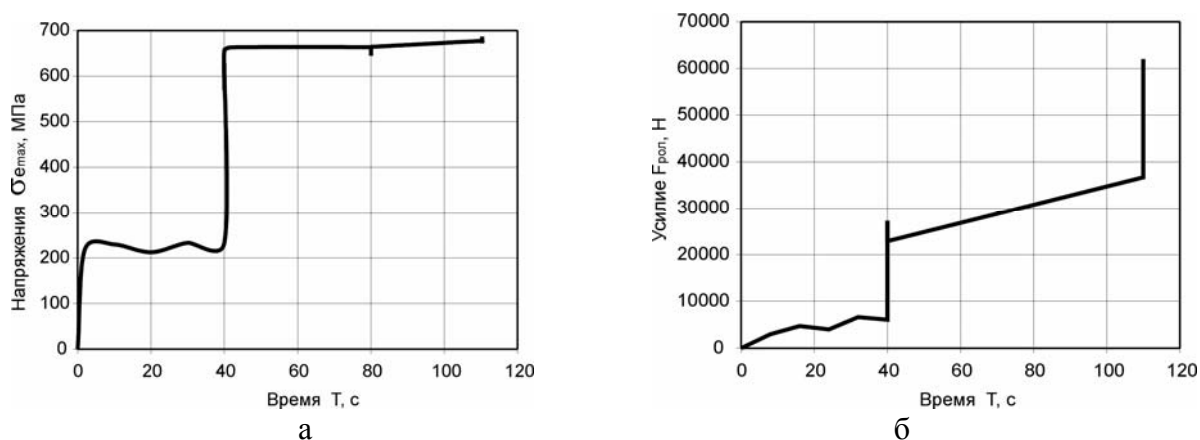


Рис. 5. Экспериментальные зависимости по результатам моделирования: а – максимальных эквивалентных напряжений от времени; б – усилия на ролик от времени формовки рифта

На основании анализа результатов моделирования можно рекомендовать для ротационной формовки рифтов в заготовках из материала сталь 10 окружную скорость вращения заготовки до 370 об/мин при поперечной скорости подачи 0,5 мм/об. Таким образом, современные персональные компьютеры и интегрированные системы позволяют одновременно моделировать процессы пластического деформирования, разрабатывать технологию изготовления сложных деталей и выполнять конструкторско-технологическую подготовку производства в короткие сроки.

ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель процесса ротационной формовки рифтов на цилиндрической поверхности в тонкостенной заготовке, позволяющая определять параметры локального напряженно-деформированного состояния в очаге деформаций, а также энерго-силовые параметры процесса.

2. Определены оптимальные параметры счета с использованием персонального компьютера с двухядерным процессором Intel, частотой 3,0 ГГц и оперативной памятью 4,0 ГБ. При моделировании тонкостенных заготовок с толщиной менее двух миллиметров число элементов модели в начале счета не должно превышать 250,0 тысяч. Определено значение шага счета $\Delta t = 0,005-0,1$ сек, позволяющее выполнять расчет задач в пределах 50 часов.

3. Разработанная модель может быть использована для инженерного анализа и проектирования технологического процесса деталей данного типа. Она позволяет на стадии проектирования оптимизировать геометрию детали и инструмента, а также технологические параметры процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гредитор М. А. Давильные работы и ротационное выдавливание / М. А. Гредитор. – М. : Машиностроение, 1971 – 239 с.
2. Давильно-обкатные работы в современном машиностроении / В. Г. Капорович, Н. Д. Барыкин, Л. Н. Вацук, М. П. Найденев, В. К. Удовенко. – К. : УкрНИИНТИ, 1971. – 178 с.
3. Могильный Н. И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках / Н. И. Могильный. – М. : Машиностроение, 1983. – 192 с.
4. 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.
5. 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. – Дніпропетровськ, 2001. – 35 с.
6. Петров А. П. Практика применения САЕ-систем при разработке техно-логических процессов обработки металлов давлением / Петров А. П., Галкин В. И., Палтиевиц А. Р. // Технология машиностроения. – 2006. – № 8. – С. 73–76.

Смаль С. Н. – президент ГАХК «Артем»;

Данченко В. Г. – канд. техн. наук, доц. НАУ «ХАИ».

ГАХК «Артем» – Государственная акционерная холдинговая компания «Артем», г. Киев;

НАУ «ХАИ» – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков.

E-mail: vgdan@ukr.net