

1553037

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени Н. Э. БАУМАНА

На правах рукописи

УДК 621.735.3.001.63.001.5.002

ГОЛЕНКОВ ВЯЧЕСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ШТАМПОВКИ С ЛОКАЛЬНЫМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ
ЗАГОТОВКИ И МЕТОДОВ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Специальность 05.03.05

“Процессы и машины обработка давлением”

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва - 1996 г.

Работа выполнена в Орловском государственном техническом университете

Научный консультант: Осадчий Владимир Яковлевич, д.т.н., профессор, Лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки и техники РФ.

Официальные оппоненты:

Семенов Евгений Иванович, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ;

Матвеев Анатолий Дмитриевич, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ;

Степанский Леонард Георгиевич, д.т.н., профессор.

Ведущая организация:

АО Орловский сталепрокатный завод

Защита состоится 22 января
диссертационного Совета Д05
техническом университете им
Бауманская ул., дом. 5.

С диссертацией
Н. Э. Баумана.

Ваш отзыв на автореферат
сим выслать по указанному
Телефон для справок

Автореферат разослан

Ученый секретарь
диссертационного Совета
к.т.н., доцент

1553037



1553037

Голеньков В. А. Разработка

ЦАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

темы. Перед отечественным машиностроением стоит задача разработки принципиально новых технологий и оборудования, конкурентноспособных на мировом рынке, позволяющих получать изделия высокого качества при наименьших затратах на их производство.

Одним из наиболее эффективных направлений получения сложных изделий являются методы локального деформирования, такие, как ковка, вальцовка, поперечно-клиновое прокатка, обкатка деталей из трубных заготовок и листовых материалов, накатка зубьев, ротационное выдавливание, сферодвижная штамповка, торцовая раскатка, непрерывно-последовательная высадка и др. Вследствие локальности деформирования резко снижается технологическая сила при операции, что обеспечивает значительное снижение металлоемкости оборудования, повышение стойкости инструмента и увеличение коэффициента использования металла.

1553037
Принципиально новым развитием этих методов являются технологии с комплексным, непрерывно-дискретным нагружением заготовки, получившие название "валковая штамповка" и сочетающие в едином процессе операции объемной штамповки и локальное деформирование неприводными роликами или приводными валками (см. рис. 1 и рис. 2). Пуансон или осаживающая траверса непрерывно воздействуют на деформируемый участок заготовки, тогда как валки (ролики) создают дискретное нагружение локального характера, периодически чередующееся с разгрузкой. Новые способы деформирования позволяют получать сплошные и полые детали, сверхтонкостенные и толстостенные изделия, изделия малых размеров, применяемые в приборостроении, и крупные для машиностроительной или авиационной промышленности, изделия круглые и некруглые в плане, с огранкой или зубьями с высокой точностью и качеством изготовления при технологической силе на порядок меньшей, чем для традиционных методов объемной штамповки. Комплексное нагружение очага деформации локальным периодическим воздействием с одновременной передачей силы через постоянно фиксируемую зону позволяет получать новый технический эффект, недостижимый другими методами деформирования.

Важным условием понимания новых процессов является установление и исследование взаимосвязи параметров, их влияния на процесс деформирования и конечный результат формоизменения заготовки. Качество изготовления деталей, производительность и стабильность или устойчивость технологических процессов валковой штамповки зависят от правильного выбора технологических и конструктивных параметров, т. е.

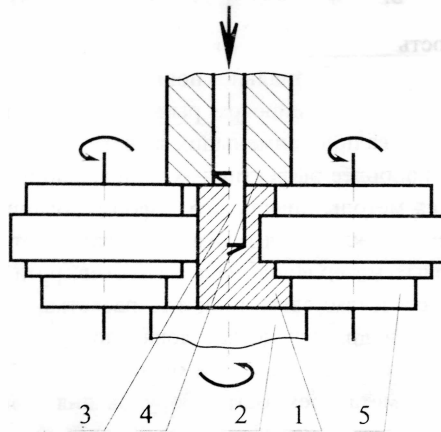


Рис. 1. Схема процесса валковой штамповки.

1 - обрабатываемая заготовка; 2 - упор; 3 - пуансон; 4 - съемник; 5 - ролики.

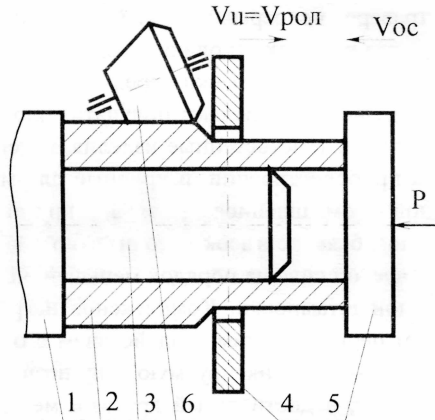


Рис. 2. Схема непрерывно-последовательной высадки с обкаткой утолщения роликами по наружному диаметру.

1 - упор; 2 - заготовка; 3 - оправка; 4 - индуктор; 5 - осаживающая траверса; 6 - ролик; V_u - скорость стола индуктора; $V_{рол}$ - скорость подачи роликовой обоймы; $V_{ос}$ - скорость осаживающей траверсы; P - сила высадки.

заданный эффект возможен только при оптимальном режиме деформирования, зависящем от соотношения прежде всего скорости перемещения инструмента в осевом направлении и скорости относительного вращения, величин обжатия, геометрических параметров валков и формы детали, взаимного перемещения инструмента в осевом, радиальном и тангенциальном направлениях и температуры заготовки. Существующие методики расчета локальных процессов деформирования, а также традиционных операций объемной штамповки с фиксированной зоной приложения деформирующей силы (прессование, выдавливание, высадка и др.) не позволяют с достаточной точностью рассчитать процессы валковой штамповки.

Тема диссертационной работы Голенкова В.А. соответствует "Критическим технологиям федерального уровня", утвержденным председателем Правительственной комиссии по научно-технической политике 21 июля 1996 г. по направлению "Модульные технологии производства массовой металлопродукции с новым уровнем свойств". Диссертационная работа выполнялась в соответствии с программами: "Авиационная технология" (утверждена решением совместной комиссии МАП и Минвуза Российской Федерации № 3 от 10.07.86 г.); "Высокие технологии высшей школы" (утверждена приказом № 486 от 20.03.96 "Об утверждении перечня минвузовских научно-технических программ на 1996 г."), проектом "Исследование пластического течения металла при локальном и комплексном нагружении", выигравшим конкурс грантов в 1996 г., проектом "Технология и оборудование для производства деталей методом валковой штамповки", вошедшим в единый заказ-наряд ГКВО РФ в 1994 г.

Целью представляемой работы являлась разработка новых способов, технологии и научно обоснованной методики проектирования процессов валковой штамповки, обеспечивающих снижение технологической силы, уменьшение расхода металла и материалоемкости оборудования, повышение качества изделий и производительности.

Автор защищает:

1. Новый технологический процесс объемной штамповки осесимметричных изделий, сочетающий операции штамповки и обкатки (валковая штамповка) и разработанные методы:

- определения влияния формы рабочей поверхности деформирующего инструмента (пуансона и обкатывающих роликов) на характер пластического течения металла;

- определения основных кинематических соотношений процесса (скорости осадки/прошивки и частоты вращения обкатывающих роликов).

2. Метод математического моделирования непрерывно-дискретных

процессов ОМД, включающий:

- переформулировку граничных условий на каждом шаге расчета в узлах конечноэлементной сетки;
- выявление точной границы зон перехода элементов в пластическое или упругое состояние с фиксацией текущего предела текучести и остаточных напряжений;
- оценку точности полученного численного решения на основе принципа двойственности построения функционала вариационной задачи.

Для реализации предложенного метода математического моделирования разработан пакет прикладных программ (ППП) “ШТАМП”.

3. Разработанные на основе математического моделирования непрерывно-последовательной высадки с обкаткой трубных изделий режимы индукционного нагрева, позволяющие стабилизировать пластическое течение металла в зоне деформации на начальной и последующих стадиях процесса, подтвержденные выпуском опытно-промышленных партий.

4. Разработаны технологические процессы холодной валковой штамповки для получения осесимметричных изделий широкой номенклатуры на основе математического моделирования с применением ППП “ШТАМП”.

Методы исследования. Теоретические исследования проводились с использованием численных моделей, построенных на базе метода конечных элементов, реализованном в специально разработанном пакете прикладных программ “Штамп”. Экспериментальные исследования течения металла, включая киносъемку, проводились в производственных условиях цеха N5 Челябинского трубопрокатного завода на модернизированном промышленном оборудовании, а также на экспериментальной установке валковой штамповки в лабораторных условиях ОрелГТУ. Деформированное состояние заготовок исследовали методом измерения микротвердости, анализировали изменение микро- и макроструктуры.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложены новые способы формоизменения заготовок на основе комбинации операций объемной штамповки и локального деформирования, позволяющие уменьшить силы контактного трения или перевести их в активные, обеспечить перемещение металла в заданном направлении при значительно меньшей силе и получать изделия сложной законченной формы с высоким качеством поверхности и улучшенными механическими свойствами, снизить трудоемкость и расширить возможности методов обработки металлов давлением.

2. Разработан метод математического моделирования непрерывно-

дискретных процессов обработки металлов давлением, включающий переформулировку граничных условий на каждом шаге расчета в узлах конечноэлементной сетки; выявление точной границы зон перехода элементов в пластическое или упругое состояние с фиксацией текущего предела текучести и остаточных напряжений; оценку точности полученного численного решения на основе принципа двойственности построения функционала вариационной задачи.

3. На основе численных расчетов непрерывно-последовательной высадки с обкаткой трубных заготовок исследованы напряженно-деформированное состояние и характер пластического течения металла в очаге деформации, выявлены основные технологические параметры, влияющие на стационарность процесса и качество получаемого изделия, а также исследован процесс холодной валковой штамповки с учетом упрочнения материала, выявлены особенности пластического течения металла и напряженно-деформированного состояния материала заготовки на различных стадиях комплексного локального нагружения, определены основные кинематические и геометрические параметры, влияющие на формоизменение, в том числе на заполнение калибра роликовой матрицы.

4. Экспериментально исследован процесс и установлены факторы, влияющие на образование и раскатку гофров на утолщении при непрерывно-последовательной высадке с обкаткой трубных изделий, исследован процесс холодной валковой штамповки, установлены факторы, влияющие на качество получаемых изделий.

Новизна технологических решений подтверждена 18 авторскими свидетельствами и патентами.

Достоверность результатов математического моделирования обеспечивается использованием принципа двойственности в решении вариационной задачи, что дает двустороннее ограничение погрешности в виде верхней и нижней оценок.

Точность экспериментальных данных обеспечивается применением современных методов и аппаратуры при исследовании процессов формоизменения заготовок. Совпадение расчетных и экспериментальных данных также подтверждает их достоверность.

Практическая ценность. Разработан ряд новых технологических процессов для холодной валковой штамповки осесимметричных деталей приборостроительной номенклатуры. Разработан пакет прикладных программ "Штамп", который может быть применен для решения широкого круга инженерных задач в области обработки металлов давлением, связанных с математическим моделированием различных, в том числе комплекс-

ных и нестационарных процессов ОМД, разработкой новых и оптимизацией известных технологий, разработкой и модернизацией технологического инструмента и оборудования в кузнечно-штамповочном производстве. На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований разработана новая технология горячей непрерывно-последовательной высадки с обкаткой трубных изделий, определены основные параметры для модернизации специализированного оборудования, в том числе индукционных нагревателей ТВЧ.

Реализация работы. Произведена модернизация специализированного гидропресса НИИПТМАШ-300 на Челябинском трубопрокатном заводе, заключающаяся в переводе гидростанции на принцип поддержания постоянства скорости главного исполнительного механизма, совместно со специалистами ЧТПЗ внедрена принципиально новая гибкая микропроцессорная система синхронизации работы пресса, разработаны и изготовлены ряд индукционных нагревателей прогрессивной конструкции.

Разработана и изготовлена опытная установка для холодной валковой штамповки мелких деталей номенклатуры Орловского АО "ОРЛЭКС", на основании анализа результатов экспериментальных и теоретических исследований разработан проект многопозиционной автоматической промышленной установки валковой штамповки, включающей ряд новых узлов и приспособлений.

Изданное учебное пособие и разработанная опытно-промышленная установка валковой штамповки используются в учебном процессе при подготовке инженеров по специальности 1204 "Машины и технология обработки металлов давлением" в ОрелГТУ.

Апробация работы. По содержанию представленной работы сделан ряд докладов и сообщений на международных, всесоюзных, всероссийских и региональных научно-технических конференциях и семинарах в крупнейших ВУЗах и НИИ различных городов России: в городах Москва (1994 г., 2 доклада), Тольятти (1989 г.), Калуга (1990 г.), Челябинск (1991 г.), Орел (1980-1995 гг.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 39 печатных работ, в том числе 18 авторских свидетельств и патентов.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 177 страницах машинописного текста, содержит 96 рисунков и фотографий, 10 таблиц и список литературы (172 наименования). Диссертация состоит из введения, 5 основных разделов и общих выводов по работе.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность решения крупной научно-технической задачи, сформулирована цель и определены основные направления по разработке новых технологических процессов штамповки с локальным деформированием заготовки и методов их проектирования.

В первом разделе проведен анализ номенклатуры изделий, изготовление которых возможно методом штамповки с обкаткой (валковой штамповки), проанализированы основные способы их получения, а также дан обзор основных методов теоретического расчета процессов ОМД.

Всю номенклатуру деталей, применяемых в различных отраслях промышленности, изготовление которых возможно методами валковой штамповки, по масштабному фактору и сложности можно условно разделить на следующие основные группы:

1. Детали малого размера (диаметром до 30 мм) со сложной ступенчатой формой, преимущественно приборостроительного назначения. Основные материалы - цветные металлы и сплавы. В настоящее время, как правило, (за исключением крепежных и некоторых других стандартизованных деталей) изготавливаются методами токарной обработки, при этом коэффициент использования металла в подавляющем большинстве не превышает 50 %. Для данной категории изделий актуальной является задача повышения производительности (по сравнению с токарной обработкой) и коэффициента использования материала.

2. Детали большого размера (диаметром 200-400 мм и более), сравнительно простой формы, изготавливаемые мелкими и средними годовыми партиями. Здесь важным является снижение в 5...10 раз необходимой силы деформирования, так как применение известных технологий (высадка на ГKM, прессование) невозможно ввиду ограниченных возможностей промышленного оборудования.

3. Детали среднего размера (диаметром 30...200 мм). Возможности совершенствования технологии изготовления такого класса изделий зависят от конкретных условий и задач производства (программы выпуска, сложности, материала) и могут быть заимствованы из решений 1 и 2 группы в различных сочетаниях.

В отдельную группу можно выделить детали, имеющие некруглые в плане сечения (шестигранник, квадрат и др.), прежде всего крепежные изделия, например, болты. Так как такие детали изготавливаются массово или крупными сериями, то на первый план выходит проблема существенного повышения производительности, повышения стойкости инструмента,

снижения трудоемкости изготовления оборудования и инструмента.

Далее приводится классификация деталей малого размера по основным признакам формы.

Установлено, что для таких деталей (преимущественно приборостроительной номенклатуры) в условиях крупносерийного и массового производства наиболее рациональным способом изготовления является холодная объемная штамповка, в частности, на холодно-высадочных автоматах и роторных линиях. Однако при серийном производстве эффективность такой технологии существенно снижается вследствие большой трудоемкости изготовления инструмента и переналадки оборудования. Кроме того, на оборудовании такого класса невозможно получать изделия со сложной ступенчатой формой боковой поверхности или с высокой тонкой стенкой вследствие значительных необходимых сил деформирования.

Делается вывод о том, что наиболее перспективной является технология изготовления осесимметричных деталей, сочетающая операции холодной объемной штамповки (осадки/высадки или прошивки) с локальным воздействием на заготовку обкатывающим инструментом. Проводится анализ таких процессов, как поперечная, поперечно-клиновья и поперечно-винтовая прокатка, торцовая раскатка. Устанавливается область применения каждого из этих способов, отмечаются характерные особенности и недостатки, в частности, общий для всех - невозможность получения деталей с отверстием одновременно с формированием ступенчатой боковой поверхности.

Далее в первом разделе приводится анализ конструкций изделий переменного сечения (ИПС) большого диаметра и основных способов их получения. Установлено, в частности, что одним из характерных представителей трубных ИПС с комлевым утолщением является труба-заготовка лонжерона (несущего элемента) лопасти вертолета МИ-26, изготавливаемая на Челябинском трубопрокатном заводе методом непрерывно-последовательной высадки.

Приводятся сведения о состоянии теоретических исследований процесса непрерывно-последовательной высадки, анализ которых показывает недостаточность теоретической базы, что является сдерживающим фактором для успешного освоения данной технологии. Дальнейшему расширению технологических возможностей НПВ будет способствовать одновременное с высадкой локальное воздействие на заготовку обкаткой утолщения роликами по наружному диаметру. Этот способ обладает рядом преимуществ, таких, как возможность получения утолщений любой длины на любых участках заготовки при высоком качестве утолщения, причем не-

обходимые силы деформирования в 5...10 раз ниже по сравнению с высадкой в контейнер (матрицу). Однако реализация данной технологии на Челябинском трубопрокатном заводе выявила ряд недостатков, вызванных отсутствием необходимой теоретической и экспериментальной проработки технологии и оборудования.

Анализ оборудования для НПВ с обкаткой (модернизированная НВМ НИИПТМАШ-300) показал, что оно обладает рядом существенных недостатков, а именно: применение жесткой системы синхронизации работы пресса приводит к перегреву начальной зоны деформации и, как следствие, развитию в этой области первого и далее по длине утолщения последующих радиальных гофров, которые при обкатке раскатываются в неустраняемые поверхностные дефекты в виде зажимов и закатов, что ведет к браку изделия. Конструкция роликового узла не предусматривает компенсатора для избыточного металла, возникающего вследствие разнотенности исходной заготовки (кольцевой и продольной). Отсутствует обоснование расчета технологических параметров оборудования, таких как сила деформирования, частота ТВЧ, скорость осаживающей траверсы, частота вращения роликовой обоймы. Особо отмечается несовершенство нагревательного оборудования (индукторов), одного из основных средств, необходимых для получения качественного изделия.

В первом разделе также приведен анализ традиционных методов теоретического расчета процессов ОМД. Установлено, что известные методы, такие, как метод характеристик и инженерный метод во многих случаях не удовлетворяют требованиям точности при проектировании технологических процессов и оборудования. Наиболее активно развивающимся в настоящее время является метод конечных элементов, так как появление высокоэффективных и доступных персональных компьютеров снимает ограничения по объему вычислений. Таким образом, именно МКЭ и построенные на его базе пакеты прикладных программ являются самым эффективным и перспективным инструментом для математического моделирования процессов ОМД.

В результате проведенного анализа и в соответствии с целью работы были сформулированы следующие основные задачи исследования:

1. Разработка метода математического моделирования непрерывно-дискретных процессов ОМД и пакета прикладных программ для его реализации.
2. Совершенствование технологии непрерывно-последовательной высадки с обкаткой трубных изделий с целью стабилизации пластического течения металла в зоне деформации на основе математического модели-

рования процесса, а также модернизация оборудования для реализации предложенной технологии.

3. Разработка на основе моделирования процессов холодной объемной штамповки с обкаткой (валковой штамповки) технологий для получения широкой номенклатуры деталей.

4. Экспериментальная и опытно-промышленная реализация разработанных технологий холодной и горячей валковой штамповки.

Второй раздел посвящен разработке метода математического моделирования непрерывно-дискретных процессов ОМД и пакета прикладных программ для его реализации.

В настоящее время наиболее прогрессивным методом математического моделирования является метод конечных элементов, позволяющий проводить расчеты без существенных упрощений и допущений.

Система определяющих уравнений МКЭ в приращениях напряжений $d\sigma_{ij}$ и деформаций $d\epsilon_{ij}$ в теории пластического течения имеет вид

$$d\sigma_{ij} = 2G \left[d\epsilon_{ij} + \frac{v d\epsilon_{kk} \delta_{ij}}{(1-2\nu)} \right] - S_{ij} S_{kl} d\epsilon_{kl} \frac{\omega}{P}, \quad (1)$$

где $S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}$ - компоненты девиатора тензора напряжений;

$$P = \frac{\bar{\sigma}^2}{3G} \left(1 + \frac{H}{3G} \right);$$

$\bar{\sigma} = \sqrt{3S_{ij}S_{ij}/2}$ - интенсивность напряжений;

$G = E / (2(1+\nu))$ - модуль сдвига;

$H = d\bar{\sigma} / d\bar{\epsilon}^p$ - модуль упрочнения;

$\bar{\epsilon}$ - интенсивность деформаций ($\bar{\epsilon}^p$ - пластических);

$\omega = 0$ - для упругих зон, $\omega = 1$ - для пластических зон.

Учет температурных воздействий T добавляет к (1) уравнение

$$\rho c_m \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + W, \quad (2)$$

где λ - коэффициент теплопроводности; c_m - удельная теплоемкость; W - мощность источников тепла; ρ - плотность материала; и приводит выражение в квадратных скобках (1) к виду:

$$\left[d\epsilon_{ij} + \frac{v d\epsilon_{kk} - \alpha(1+\nu)(T - T_0)}{1-2\nu} \delta_{ij} \right],$$

где α - коэффициент линейного теплового расширения.

Предполагается, что накопленная пластическая деформация при активном нагружении для любых напряженных состояний определяется одной и той же функцией текучести:

$$f(\sigma, \varepsilon^p) = \bar{\sigma} - A - B(\bar{\varepsilon}^p + D)^C, \quad (3)$$

где A, B, C, D - некоторые определенные величины, зависящие от T , причем $0 < C < 1, D > 0$.

Функция текучести f характеризует переход материала из упругого состояния в пластическое. В частности, при $f < 0$ материал деформируется по упругому закону, при $f = 0$ наступает состояние текучести. Принято, что состояние $f > 0$ не может быть реализовано.

Значение H при этом

$$H = \frac{d\bar{\sigma}}{d\varepsilon^p} = BC(\bar{\varepsilon}^p + D)^{C-1}.$$

Переход из пластического состояния в упругое характеризует величина $d\xi = S_{ij} d\varepsilon_{ij} \omega / P$. Если $d\xi < 0$, то материал считается вновь перешедшим в упругое состояние. Накопленное значение интенсивности напряжений становится новым значением текущего предела текучести.

Постановка граничных условий в упруго-пластических задачах имеет свои особенности по сравнению с упругими.

Для типичных случаев обработки металлов давлением граничные пошаговые приращения перемещений Δu складываются для пластических элементов из приращений перемещений инструмента и перемещений относительно инструмента.

Δu - определяется на каждом шаге из решения систем уравнений:

$$\{U\}[K] = \{Q\},$$

где $\{U\}, \{Q\}$ - векторы перемещений и внешних сил; $[K]$ - глобальная матрица жесткости, содержащая соотношения (1), (2).

Еще одна особенность связана с корректным выявлением остаточных напряжений и деформаций. После снятия нагрузки, задаваемой нередко перемещениями инструмента, силовые граничные условия должны формулироваться в виде накопленных до этого момента нагрузок, но с обратным знаком.

При моделировании процессов обработки металлов давлением нередко возникает необходимость в удовлетворении сложных граничных ус-

ловий.

Пусть при заданном нагружении необходимо обеспечить выполнение принадлежности модели (с геометрической точки зрения) некоторой допустимой области ω . При моделировании процессов обработки давлением границами ω являются рабочие поверхности формообразующих инструментов. Пусть граница допустимой области представляет собой несколько фрагментов Γ , каждый из которых описывается в виде:

$$f(U) = 0, \quad U \in \Gamma,$$

где f - некоторая непрерывная функция, причем в допустимой области в достаточно малой окрестности данного фрагмента значение этой функции отрицательно, а в недопустимой области положительно.

Таким образом, для выполнения заданных ограничений нужно следить за тем, чтобы для достаточно близких к фрагменту точек было выполнено соотношение $f(U) \leq 0$.

Если найдутся точки, которые переходят в недопустимую область из допустимой области, т. е., одновременно выполнены соотношения $f(U) < 0$ и $f(U + \Delta U) > 0$, то следует приступить к серии пробных шагов для определения подходящей части нагрузки, которая переводит точку из внутренней части допустимой области на ее границу.

Граничные условия, используемые при решении задач расчета напряженно-деформированного состояния деформируемого твердого тела, можно разделить на геометрические, которые отражают заданные перемещения, и силовые, которые характеризуют внешние силы.

Для применения МКЭ необходимо, чтобы граничные условия решаемой задачи были аппроксимированы как условия в узлах конечно-элементной сетки (КЭС). Такая аппроксимация не вызывает больших затруднений, если расположение узлов КЭС и значения граничных условий (геометрических и силовых) известны до начала расчета.

Процессы обработки давлением обычно приводят к возникновению больших перемещений в материале заготовки. Расчет таких перемещений производят пошагово. При пошаговом расчете больших перемещений граничные условия в узлах КЭС (кроме закрепленных) для любого шага, кроме начального, не могут быть в общем случае определены до начала расчета, т. к., начальное расположение узлов для любого шага продолжения определяется только после расчета их конечного расположения на предыдущем шаге. Не зная расположения узла КЭС, нельзя правильно задать граничные условия для него. Следовательно, если при пошаговом расчете больших перемещений по МКЭ расчетная программа рассчитывает не-

сколько шагов подряд без вмешательства препроцессора, то она сама должна обладать способностью задавать граничные условия в узлах КЭС, используя вычисленные значения координат узлов и некоторую не зависящую от геометрии КЭС информацию, подготовленную препроцессором до начала расчета.

При моделировании процессов обработки давлением в качестве такой информации может быть использована информация о геометрии рабочих поверхностей инструмента и оснастки, контактирующих с заготовкой в процессе ее обработки, и программа обработки, содержащая информацию о последовательности и величине рабочих ходов инструмента.

Важнейшими факторами при определении напряженно деформированного состояния являются зависимости между напряжением текучести и температурой, а также распределение температуры по очагу деформации. Одна из основных операций, выполняемых при исследовании температурных полей - вычисление матриц теплопроводности и теплоемкости, а также вектора "тепловых сил" для конечных элементов, с использованием которых осуществляется формирование системы алгебраических уравнений (задача стационарной теплопроводности), либо системы обыкновенных дифференциальных уравнений (задача нестационарной теплопроводности). Указанные матрицы получают в результате ансамблирования соответствующих элементных матриц, определяемых при последовательном рассмотрении каждого отдельного конечного элемента.

Объединение всех конечных элементов в очаге деформации приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$[C] \frac{dT}{dt} + [R]T + F = 0, \quad (4)$$

где $[C]$, $[R]$, F - соответственно матрицы теплоемкости, теплопроводности и вектор "тепловых сил" для конструкции (очага деформации); T - вектор узловых температур.

Рассмотрим произвольную расчетную точку M_i дискретной модели, в которой проверяется выполнение критерия перехода из упругого состояния в пластическое. Пусть на $i-1$ шаге в этой точке вычислены смещение U_{i-1} , интенсивность деформации $\bar{\epsilon}_{i-1}$ и интенсивность напряжения $\bar{\sigma}_{i-1}$, а также их приращения ΔU_i , $\bar{\epsilon}_i$, $\bar{\sigma}_i$.

В начале шага значение функции текучести

$$f_{i-1} = f(\bar{\sigma}_{i-1}, \bar{\epsilon}_{i-1}) < 0, \quad (5)$$

что соответствует упругому состоянию точки M_i . Считая шаг упругим, подсчитываем напряжения в конце шага $\bar{\sigma}_i^* = \bar{\sigma}_{i-1} + \Delta\bar{\sigma}_e$.

В этом случае

$$f_i^* = f(\bar{\sigma}_{i-1} + \Delta\bar{\sigma}_e, \bar{\varepsilon}_{i-1} + \Delta\bar{\varepsilon}_e) > 0, \quad (6)$$

что является недопустимым состоянием. Лишь часть приращения, обозначим ее θ , является допустимой:

$$f(\bar{\sigma}_{i-1} + \theta\Delta\bar{\sigma}_e, \bar{\varepsilon}_{i-1} + \theta\Delta\bar{\varepsilon}_e) = 0. \quad (7)$$

Если функция f непрерывна и выполнены условия (5) и (6), то, как известно, существует точное решение уравнения (7), и получить его можно с минимальными вычислительными затратами с любой степенью точности даже простейшими итерационными методами.

Вопрос о погрешности итерационного решения является одним из центральных при использовании численных методов, в частности МКЭ. Погрешности накапливаются на каждом шаге расчета, особенно при циклическом повторении нагружения и разгрузки, характерного для процессов валковой штамповки. Существующие априорные оценки точности решения носят общий характер и не учитывают специфики решаемой задачи. Для практики наиболее приемлемы апостериорные оценки.

Укажем два подхода к получению апостериорных оценок погрешности. Первый основан на методе двойственности, когда на одной и той же конечно-элементной сетке решаются две различные задачи, что позволяет, сравнивая результаты расчетов, получить апостериорную оценку погрешности. При втором подходе необходимо провести расчеты на различных сетках (разреженной и более густой). Сравнение результатов позволяет оценить погрешность приближенного решения.

Суть метода двойственности состоит в следующем. Экстремальной задаче минимизации некоторого функционала ставится в соответствие двойственная ей задача максимизации. Совместное решение этих двух задач позволяет найти двусторонние приближения к точной нижней грани исходного функционала. Пользуясь различными энергетическими неравенствами, можно получить оценки самих решений и их дифференциальных характеристик.

Построить двойственные функционалы для различных краевых задач можно следующим образом.

Пусть A - положительно определенный оператор в гильбертовом пространстве H , и пусть задача $Au = f$, где $f \in H$, решается приближенно

МКЭ при определенных краевых условиях. Пусть u_n - n -е приближение (n - число узлов МКЭ) точного решения u_0 . Тогда имеет место оценка

$$\|u_n - u_0\|_H \leq \frac{1}{\gamma} \|f - Au_n\|_H. \quad (8)$$

Здесь норма $f(U + \Delta U) > 0$, $\|u\|_H$ определяется исходным пространством H , γ - некоторая положительная константа.

Однако, оценка (8) может оказаться либо слишком грубой, так как, вообще говоря, $\|f - Au_n\|_H$ не стремится к нулю с ростом n , либо вообще не имеет смысла. Поэтому избирают другой, более тонкий способ получения апостериорных оценок погрешностей. Известно, что

$$J^0(u_n) = \|u_n - u_0\|^2 - \|u_0\|^2,$$

где J^0 - функционал, задача минимизации которого $J^0(u) \xrightarrow{u \in H} \inf$ совпадает с исходной краевой. Отсюда следует

$$\|u_n - u_0\|^2 = J^0(u_n) - J_0(u_0). \quad (9)$$

Значение точной нижней грани функционала $J^0(u_n)$ неизвестно. Однако, если известно какое-либо число J_0 , не превосходящее её, то из (9) получим оценку отклонения u_n от u_0 в энергетическом пространстве

$$\|u_n - u_0\|_H \leq \frac{1}{\gamma} \sqrt{J^0(u_n) - J_0}. \quad (10)$$

Константа γ может быть любым приближением снизу к первому собственному значению оператора A .

Для получения последовательности чисел, стремящихся к $\inf J^0(u_n)$, снизу используется теория двойственных экстремальных задач. Задачу (9) назовем прямой, а задачу максимизации двойственного функционала $J_0(u)$ - двойственной, которая запишется в виде:

$$J_0(u) \xrightarrow{u \in H} \sup. \quad (11)$$

Таким образом получим

$$\inf_{u \in H} J^0(u_n) = \sup_{u \in H} J_0(u), \quad (12)$$

и для оценки n -го приближения u_n достаточно определить n -е приближение u и воспользоваться вилкой $|J^0(u_n) - J_0(u)|$. Отметим, что

$\|u_n - u_0\| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$ и оценка (10) в отличие от (8), распространяется на обобщенные решения.

Далее в разделе приводится описание структуры основных блоков и сервисных подпрограмм универсального пакета прикладных программ “ШТАМП” для моделирования процессов ОМД на основе метода конечных элементов с высокой степенью достоверности получаемых результатов при многовариантном выборе граничных условий.

Третий раздел посвящен разработке общей методики проведения экспериментальных исследований, методики математического планирования и статистической обработки полученных результатов.

Определена методика планирования эксперимента и статистической обработки полученных данных, основанная на известных уравнениях теории вероятности и математической статистики, в частности, на теории “малой выборки” для исследования непрерывно-последовательной высадки, т. к. проведение полномасштабных экспериментов экономически нецелесообразно ввиду высокой стоимости исходных заготовок (свыше 20 тыс. руб. в ценах 1990 г.). Для полученных данных определялось среднее арифметическое, дисперсия и погрешность измерения при заданной доверительной вероятности.

Разработана методика экспериментальных исследований НПВ “свободной” и в роликовую матрицу. Определены условия проведения эксперимента. В качестве основного оборудования для высадки используется модернизированная НВМ НИИПТМАШ-300, установленная в цехе № 5 ЧТПЗ, с индукционными нагревателями, применяемыми в настоящее время для “свободной” высадки, и индуктором конструкции ВЗМИ для высадки в роликовую матрицу. Приведены основные технические характеристики НВМ. Объектом исследований служит процесс получения труб-заготовок лонжеронов по чертежу ЭЛ-90-29-02 по двухпереходной технологии в соответствии с ТУ 14-158-25-76, исходная заготовка - труба 273x24 мм из стали 40ХН2МАШ длиной 6-6,5 м. Далее определены параметры, оказывающие решающее влияние на течение процесса, и способы и методика их регистрации.

Температуру в зоне высадки фиксировали бесконтактным способом пирометром ППТ-131 и записывали через преобразователь РК-15А-2. Скорость вспомогательной траверсы снимали через специально сконструированный блок сопряжения с датчика скорости на пульте НВМ.

Для уяснения динамики процесса высадка фиксировалась кинокамерой “Красногорск-3” (с частотой съемки 1 кадр в секунду), установленной на специальном штативе, визировка кинокамеры сверялась по визировке

пирометра.

Для раскрытия динамики процесса образования гофров разработана оригинальная методика анализа результатов, заключающаяся в совмещении по общей абсциссе на слепке полученного утолщения (начальной зоны) графиков изменения скорости осаживающей траверсы и температуры зоны деформации.

Разработанная методика позволяет раскрыть динамику процесса образования гофров при высадке, получить статистически значимые результаты для дальнейшего использования в теоретических исследованиях и разработке новой технологии НПВ.

Для экспериментов по исследованию макроструктуры использовались продольные темплеты, вырезанные из комлей труб, подвергнутых высадке по маршруту "диаметр 273×24 мм → диаметр 315×45 мм". Исследование микроструктуры производили на вырезанных из продольных темплетов поперечных образцах в соответствии с требованиями ТУ на данные изделия.

Далее в третьем разделе приводится методика исследования процесса холодной валковой штамповки деталей приборостроительной номенклатуры. В качестве оборудования использовали вертикальный гидравлический пресс усилием 630 кН модели ДВ 2428А, на который монтировали экспериментальную установку валковой штамповки.

Формоизменение осуществляли с различными соотношениями диаметров заготовки и пуансона $D_n / d_{\text{ш}}$, разной формой торца пуансона - плоской и конической с углами 90 и 120 градусов, материал заготовок - Л63, сталь 10КП, Д16, ЛС59.

Исследовали влияние формы торца пуансона и соотношение диаметра пуансона и заготовки на характер пластического течения металла и качество получаемого изделия. Распределение упрочнения по сечению заготовки определяли путем измерения микротвердости, для чего образцы закрепили в обойме эпоксидной смолой. При этом слой материала, наклепанный при разрезании образцов, удаляли шлифованием и затем полировали. Измерение микротвердости проводили путем внедрения алмазной пирамиды с углом при вершине 136° под нагрузками 50 г для латуни и алюминия и 100 г для стали на микротвердомере ПМТ-3У4.2.

После измерения твердости в различных точках сечения заготовки результаты обрабатывали и затем по ним строили изоскляры - линии равной твердости.

Четвертый раздел посвящен исследованию процесса и совершенствованию технологии и оборудования для непрерывно-последовательной,

1553037

высадки с обкаткой трубных изделий.

Установлено, что при высадке первого перехода по принятой технологии (параметры процесса указаны) в начальный период возникает перегрев зоны деформации. Это происходит из-за того, что в этот момент индуктор неподвижен, и зона нагрева симметрична относительно его плоскости. После начала высадки (и, соответственно, начала движения индуктора) входящий участок зоны деформации получает дополнительную тепловую энергию, в этой зоне происходит наиболее активное формоизменение, приводящее к возникновению и развитию первого (наибольшего) радиального гофра. При этом индуктор “проскакивает” недогретый участок со скоростью, превышающей номинальную, а после остывания начальной зоны снова останавливается или замедляется до скорости ниже расчетной. В “холодной” зоне на утолщении формируется утяжка (впадина), а следующий перегретый участок развивается в последующий радиальный гофр, и далее процесс повторяется в виде затухающих колебаний. Просмотр киноматериалов с обычной скоростью позволил проследить этот процесс в динамике, а анализ обработанных графиков показал, что зоне первого и последующих гофров соответствуют участки пиков температуры, а зонам провалов - пики скорости осаживающей траверсы.

Анализ результатов высадки второго перехода показал аналогичные результаты, причем образование гофров усугублялось тем, что складки, оставшиеся на утолщении после первой операции, из-за близости к индуктору перегревались, и гофры на втором переходе получались более ярко выраженными, а впадины вырождались в складки и зажимы.

Отмечено, что конструкция индукторов несовершенна, по периметру зоны деформации выделяются четыре участка с различными условиями нагрева (2 зоны полувитков, зона подвода токоведущих шин и зона контакта), что приводит к кольцевой разностенности получаемого утолщения.

Высадка в роликовую матрицу производилась на этом же оборудовании с применением специального индуктора (без магнитопровода).

Расшифровка полученных результатов позволила сделать вывод об аналогичности процессов, протекающих в начальный период “свободной” высадки и НПВ с обкаткой. Кроме того, при обкатке периодически возникает переполнение очага деформации ввиду отсутствия в конструкции роликовой матрицы компенсатора избытка металла, возникающего от разностенности исходной заготовки, что приводило к вытеснению материала в зазор между роликами и индуктором с последующей раскаткой в “требешок” (осевой гофр).

Таким образом, установлено, что для интенсификации процесса НПВ с применением методов локального воздействия (обкатки) необходимо разработать новые конструкции индукторов, гибкую систему синхронизации и соответствующую модернизацию оборудования, принципиально новой узла обкатки на основе теоретической проработки процесса.

Далее приводятся данные по исследованию структуры металла утолщений, полученных “свободной” непрерывно-последовательной высадкой и высадкой с обкаткой. Установлено, что при обкатке макроструктура комля при формообразовании на всей стадии процесса соответствует профилю наружной и внутренней комлевой части высаженного участка; характер волокнистости следующий: в нижней части утолщения (прилегающей к оправке) волокнистость слабая, зернистость крупная, размеры зерен и характер волокнистости соответствуют характеристикам исходной заготовки. В средней части образцов заметно изменение волокнистости: наблюдается слабая волокнистость, увеличивающаяся по мере увеличения диаметра. Резкие отличия макроструктуры образцов, полученных при обкатке и при “свободном” течении металла, наблюдается в верхней трети сечения образцов. У образца, высаженного без обкатки, наблюдается значительное увеличение волокнистости, размер зерен значительно больше, чем в средней части образца. У образцов же, полученных при обкатке, наоборот, волокнистость почти полностью исчезает, а размер зерна уменьшается. Это вызвано обкаткой и свидетельствует о значительном улучшении структуры металла при использовании обкатки.

Приводятся также данные по исследованию микроструктуры, механических характеристик металла утолщения после обкатки, данные по влиянию разностенности исходной заготовки на качество получаемого изделия.

На основании экспериментов выявлены параметры, непосредственно влияющие на динамику и характер роста осевого гофра, т. е. глубина пластической проработки металла заготовки при обкатке, соотношение скорости перемещения осаживающей траверсы и частоты вращения роликовой обоймы, режим нагрева и т. д. Составлена математическая модель процесса (расчетная схема), определены начальные и граничные условия. Напряженно-деформированное состояние заготовки на участке локального нагрева и высадки принято осесимметричным, так как воздействие обкатки практически не распространяется на данный участок. По сравнению с высадкой в контейнер роликовая матрица оказывает пренебрежимо малое влияние на температурное поле в заготовке, ее роль сводится к ограниче-

нию диаметра высаживаемого утолщения.

Моделирование локального деформирования утолщения при обкатке также может быть сведено к двумерной задаче за счет использования Эйлеровых координат узлов КЭ. Деформация меридиональных сечений заготовки оценивалась на трехмерной конечноэлементной области, заданной в Лагранжевых координатах. Периодическое перемещение внешней границы меридиональных сечений моделирует воздействие обкатывающих роликов и упругую разгрузку в локальной области заготовки.

Пошаговый анализ с помощью ППП "ИТАМТ" позволил вскрыть специфическую динамику изменения формы и размеров очага пластичности. Так, при приложении осевой нагрузки зона формируется преимущественно во внутренних слоях заготовки, затем, при прохождении ролика над исследуемым сечением, начальная зона пластичности вырождается и начинается формирование вторичной зоны непосредственно под роликом, причем высота образующегося осевого гофра определяется шириной выхода пластичной зоны на свободную поверхность. Сравнение полученных данных с экспериментальными показали, что математическая модель корректно описывает реальный процесс и может быть использована для дальнейших исследований.

Затем в разделе приводятся результаты расчета при различных скоростях осаживающей траверсы, на основе которых получена зависимость, позволяющая выбрать необходимое соотношение технологических параметров процесса, позволяющих исключить образование осевого гофра на поверхности изделия.

На основании результатов расчета разработана новая технология непрерывно-последовательной высадки (рис. 3), включающая алгоритм управления работой оборудования. Новизна технологии высадки заключается в том, что в начальный (нестабильный) период процесса индукционный нагреватель перемещают независимо от осаживающей траверсы со скоростью, равной расчетной, что исключает перегрев начальной зоны и образование первого и последующих гофров, а по достижении утолщением номинального диаметра поддерживают равные скорости индуктора и траверсы до окончания процесса с использованием микропроцессорного управления. Кроме того, при высадке в роликовую матрицу с целью полного перекрытия зоны деформации роликами на положение последней влияют потоком воздуха в зазор между индуктором и заготовкой (рис. 4). Предлагаемая технология защищена двумя авторскими свидетельствами.

Для реализации предложенной технологии произведена модернизация гидропресса "НИИПТМАШ-300", установленного в цехе N 5 ЧТПЗ,

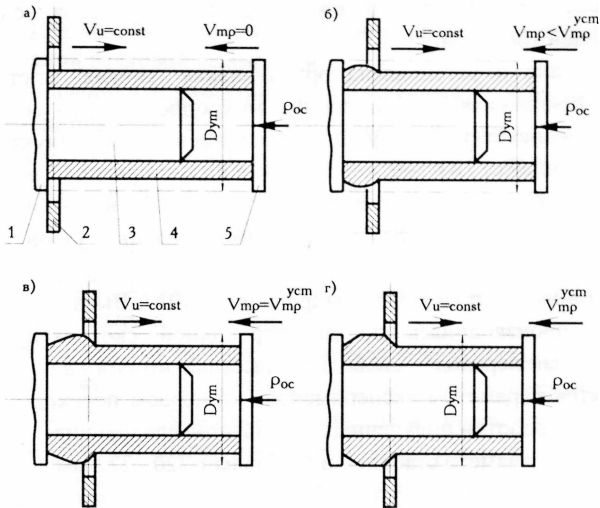


Рис. 3. Схема непрерывно-последовательной высадки: а) - начальная стадия процесса; б) - неустановившийся режим высадки; в) - момент достижения установившегося режима высадки; г) - установившийся режим высадки.

1 - заготовка; 2 - оправка; 3 - упор; 4 - индуктор; 5 - траверса; V_u - скорость стола индуктора; V_{mp} - скорость осаживающей траверсы; P_{oc} - осевое усилие; D_{ym} - номинальный диаметр утолщения.

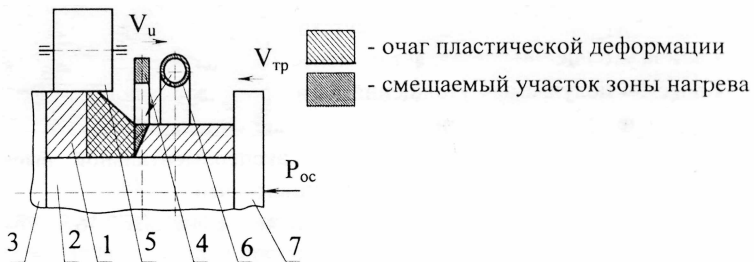


Рис. 4. Конструкция индуктора для реализации технологии высадки со смещением очага деформации от индуктора к роликовой матрице.

1 - заготовка; 2 - оправка; 3 - упор; 4 - индуктор; 5 - ролик; 6 - спреер; 7 - осаживающая траверса; V_u - скорость стола индуктора; V_{mp} - скорость осаживающей траверсы; P_{oc} - осевое усилие.

закрывающаяся в следующем:

- гидросистема переведена в режим поддержания постоянной скорости осаживающей траверсы;

- разработана и установлена оригинальная “гибкая” система синхронизации, основанная на применении микропроцессора;- создан ряд перспективных конструкций индукционных нагревателей (индукторы для высадки на гидропрессе ПО-540, неразъемные индукторы для I перехода и II перехода в роликовую матрицу, индуктор для высадки в один переход);

- произведен подбор и установка вспомогательных узлов, приспособлений и аппаратуры. Приводятся исходные данные и результаты экспериментальной высадки на модернизированной НВМ. Высадка в роликовую матрицу производилась по двухпереходной скорректированной технологии, первый переход - “свободная” высадка, второй - в ролики.

Приводятся параметры экспериментов на первом переходе, результаты обмеров и обработки полученных результатов следующие:

- внутренний диаметр стабилен и составляет 220...222 мм;
- наружная поверхность утолщения не имеет складок, диаметр составляет 316...321 мм;
- общая длина утолщения составляет 600...610 мм.

Таким образом, модернизация оборудования и применение новой технологии позволяют получить изделие повышенного качества после первого перехода.

Далее приводятся данные экспериментов и результаты высадки второго перехода в роликовую матрицу:

- внутренний диаметр стабилен и составляет 220 мм;
- наружный диаметр утолщения составляет 350...355 мм, складки и зажимы на поверхности утолщения отсутствуют;
- длина утолщений составляет не менее 260 мм.

Качество получаемых утолщений на втором переходе соответствует ТУ, что и является одной из конечных целей настоящей работы.

Обработка полученных результатов экспериментальной высадки утолщения за один переход позволяет установить, что:

- наружный диаметр утолщения стабилен и составляет 362...374 мм на длине не менее 200 мм;
- складки и зажимы на поверхности отсутствуют;
- на начальном участке наблюдался незначительный отход металла от оправки до диаметра 235 мм, что допускается ТУ на заготовки лонжеронов.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность полу-

чения лонжеронов за один переход при использовании предложенной технологии высадки.

Пятый раздел посвящен исследованию процесса и разработке технологии холодной валковой штамповки.

Установлено, что развитие очага пластической деформации начинается у кромки пуансона. По мере внедрения пуансона граница расширяется в направлении вниз и к оси заготовки, формируя в дальнейшем куполообразную зону пластической деформации. Внутри купола у середины торца пуансона остается упругая зона затрудненного деформирования.

При дальнейшем деформировании очаг пластической деформации достигает дна заготовки, а затем и боковой поверхности. При этом упругая зона постепенно вырождается (рис 5а).

При накатывании ролика на боковую поверхность заготовки интенсивность напряжений под пуансоном уменьшается, материал переходит в упругое состояние и начинается формирование новой зоны пластической деформации (рис 5б). Далее приводится анализ результатов моделирования валковой штамповки при различных отношениях скорости прошивки к частоте вращения заготовки.

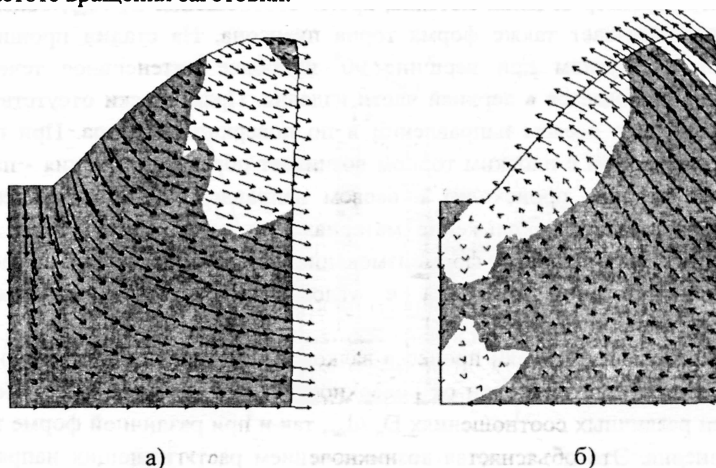


Рис. 5. Очаг пластической деформации и векторы пластического течения металла: а - стадия прошивки; б - стадия обкатки

На характер пластического течения металла большое влияние оказывает отношение диаметра пуансона к диаметру заготовки. Так, при соотношении $D_n / d_{\text{зг}} = 0,2$ зона наибольших деформаций сосредоточена в основном в центральной части заготовки под пуансоном в виде купола, про-

слеживается также развитие этой зоны к боковой поверхности заготовки. Формоизменение, в основном, идет в сторону увеличения высоты заготовки. В интервале $D_n / d_{\text{шр}}$ от 0,2 до 0,5 объем заготовки, охваченный деформацией, увеличивается, в результате чего происходит изменение как высоты, так и диаметра заготовки.

В случае дальнейшего увеличения отношения $D_n / d_{\text{шр}}$ до 0,8 неравномерность деформации проявляется в еще большей степени. Кольцевая часть заготовки деформируется и вытесняется из-под пуансона. При этом максимальные деформации сосредоточены на участке между кромкой пуансона и боковой поверхностью заготовки.

При соотношении $D_n / d_{\text{шр}} = 0,2$ наиболее упрочненная область сосредоточена под пуансоном в виде купола (аналогично распределению максимальных деформаций в данном сечении). При увеличении соотношения $D_n / d_{\text{шр}}$ до 0,5 упрочнению подвергается металл уже и у боковой поверхности заготовки. При соотношении диаметров 0,8 наиболее упрочняется выдавливаемая стенка изделия, а также область под пуансоном и боковая поверхность детали при минимальном упрочнении вблизи упора.

На характер течения металла, кроме соотношения $D_n / d_{\text{шр}}$, большое влияние оказывает также форма торца пуансона. На стадии прошивки пуансоном с углом при вершине 90° наиболее интенсивное течение металла наблюдается в верхней части изделия. Практически отсутствуют перемещения в осевом направлении и по поверхности упора. При прошивке пуансоном с плоским торцом возникает обратная ситуация - перемещение металла происходит в осевом направлении из-под пуансона. Также наблюдается скольжение материала по поверхности упора, что приводит к значительному формоизменению заготовки в нижней ее части. При использовании пуансона с углом конуса 120° наблюдается промежуточная картина.

При анализе модели процесса валковой штамповки обнаружено явление отрыва дна заготовки от поверхности упора, которое имеет место как при различных соотношениях $D_n / d_{\text{шр}}$, так и при различной форме торца пуансона. Это объясняется возникновением растягивающих напряжений в осевой области заготовки.

На основании анализа результатов математического моделирования процесса валковой штамповки разработан ряд технологических процессов изготовления различных типов осесимметричных деталей - ступенчатых сплошных и с внутренней полостью (рис. 6), типа "стержень с головкой", деталей типа гильзы (стакана) (рис. 7), а также оригинальная технология валковой штамповки из отливки на одной позиции обработки.

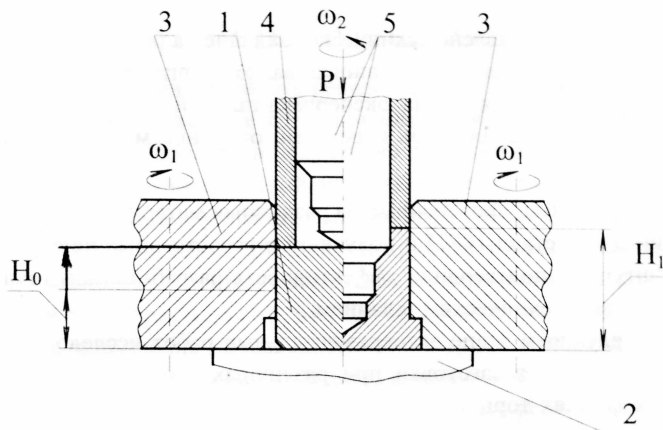


Рис. 6. Схема изготовления ступенчатых деталей с внутренней полостью.

1 - заготовка; 2 - упор; 3 - ролики; 4 - пуансон осадки; 5 - пуансон выдавливания.

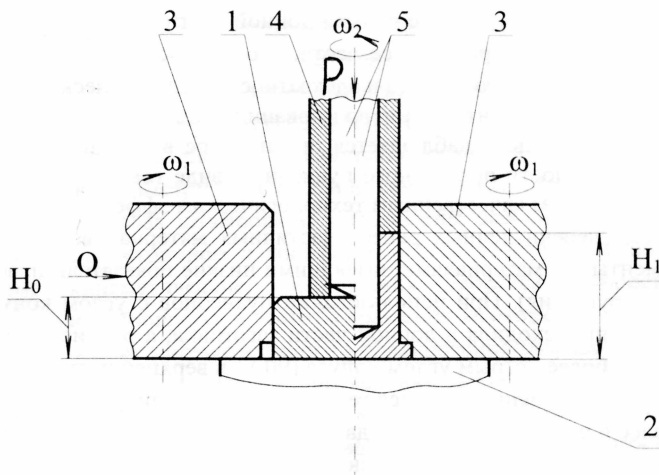


Рис. 7. Схема изготовления деталей типа стакана.

1 - заготовка; 2 - упор; 3 - ролики; 4 - пуансон осадки; 5 - пуансон выдавливания.

Для реализации предложенных вариантов холодной валковой штамповки осесимметричных деталей ОрелГТУ совместно с Орловским АО

“ОРЛЭКС” было составлено техническое задание на разработку и изготовление опытно-промышленной установки валковой штамповки.

Далее приводится схема экспериментальной установки, описание взаимного расположения узлов и деталей, описание монтажа, наладки и работы установки.

Эксперименты, проведенные на различных материалах - латуни Л63, алюминии Д16 и стали 10КП и полученные качественные полуфабрикаты детали “штуцер”, подтвердили эффективность разработанной технологии в соответствии с техническим заданием.

На следующем этапе экспериментальных работ исследовали характер формоизменения заготовки при различных соотношениях $D_n / d_{\text{ш}}$ и различных формах торца прошивного пуансона. Подтвердились теоретические данные, полученные при математическом моделировании процесса холодной валковой штамповки. Так, при использовании пуансона с углом конуса 90° преимущественное течение металла наблюдается в верхней части заготовки, что приводит к неполному заполнению донного фланца, а при использовании пуансона с углом конуса 180° (плоского) наблюдалась обратная картина вплоть до переполнения калибра роликовой матрицы. Кроме того, отмечено явление отрыва донной части заготовки от плоскости упора вблизи центральной ее части, что полностью подтвердило результаты теоретического расчета и адекватность математической модели.

Также отмечено, что при использовании пуансонов с соотношением $D_n / d_{\text{ш}}$ от 0,8 и больше наблюдается интенсивное встречное течение металла по поверхности прошивного пуансона в виде тонкостенной трубки, что является новым качественным технологическим эффектом.

Кроме перечисленных ранее пластичных материалов, проводились эксперименты и с материалами, имеющими низкие показатели пластичности (до разрушения). При использовании пуансонов с углом конуса 180° разрушение происходила в донной части заготовки, а при использовании пуансонов с более острым углом конуса (90°) - в верхней части детали, что согласуется с полученными ранее теоретическими данными.

Далее в разделе приводятся данные по исследованию распределения микротвердости по осевому сечению получаемых изделий.

Завершается раздел определением оптимальной зависимости скорости прошивки от частоты вращения заготовки при различных геометрических соотношениях заготовки и инструмента. Приводится анализ системы привода и вариант ее модернизации с целью расширения технологических возможностей установки.

ИТОГИ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. В представленной работе решена крупная научно-техническая задача, которая заключается в создании методики проектирования новых формоизменяющих процессов получения сплошных и полых, сверхтонкостенных и толстостенных изделий, изделий малых размеров, применяемых в приборостроении, и крупных для машиностроительной или авиационной промышленности, изделий круглых и некруглых в плане, с огранкой или зубьями с высокой точностью и качеством изготовления при технологической силе в 5 ... 10 раз меньшей, чем для традиционных методов объемной штамповки, повышение производительности труда и снижение металлоемкости в заготовительном производстве машино- и приборостроения.

2. Разработан метод математического моделирования непрерывно-дискретных процессов ОМД, включающий:

- переформулировку граничных условий на каждом шаге расчета в узлах конечноэлементной сетки;

- выявление точной границы зон перехода элементов в пластическое или упругое состояние с фиксацией текущего предела текучести и остаточных напряжений;

- оценку точности полученного численного решения на основе принципа двойственности построения функционала вариационной задачи.

Предложенный метод математического моделирования реализован в пакете прикладных программ (ППП) "ШТАМП".

3. Впервые предложен новый технологический процесс объемной штамповки осесимметричных изделий, сочетающий операции штамповки и обкатки (валковая штамповка); установлены особенности течения металла в осесимметричном и локальном очагах деформации; определены основные кинематические соотношения процесса (скорости осадки/высадки или прошивки и частоты вращения заготовки).

4. На основе математического моделирования разработана промышленная технология непрерывно-последовательной высадки с обкаткой трубных изделий, включая алгоритм управления работой оборудования с выходом на адаптивный режим, позволяющий стабилизировать пластическое течение металла в зоне деформации на начальной и последующих стадиях процесса.

5. Получены опытно-промышленные партии трубных изделий методом непрерывно-последовательной высадки с обкаткой на модернизированном оборудовании; теоретическое моделирование позволило определить технологические параметры непрерывно-последовательной высадки

для изготовления заготовок лонжеронов винта вертолета за один переход в полном соответствии с техническими требованиями.

6. Создана опытно-промышленная установка холодной валковой штамповки и проведены успешные экспериментальные исследования предложенных технологических процессов, результаты которых использованы в техническом проекте нового вида штамповочного оборудования, сочетающего возможности локального периодического воздействия с одновременной передачей силы через постоянно фиксируемую зону.

7. На основе математического моделирования с применением ППП "ШТАМП" разработан ряд новых схем осесимметричного формоизменения заготовок методом холодной валковой штамповки для получения осесимметричных изделий широкой номенклатуры одного из ведущих приборостроительных предприятий - АО "ОРЛЭКС".

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Голенков В. А. и др. Математическое моделирование процессов обработки материалов давлением: Учеб. пособие / В. А. Голенков, В. И. Кондрашов, З. П. Зыкова. - М.: Машиностроение, 1994. - 272 с.

2. Определение оптимальных геометрических параметров зоны пластической деформации при свободной высадке / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, И. В. Коряжкин, Б. А. Егоров // Тез. докл. рег. науч. - техн. конф. НТО Машпром. Новые достижения науки и техники в технологии машиностроения, апрель 1983 г. - Орел, 1983. - С. 80 - 82.

3. Голенков В. А., Егоров Б. А. О новом способе штамповки - локальном деформировании в роликовых матрицах // Прогрессивная технология в машиностроении и приборостроении: Сб. науч. - техн. работ НТО Машпром. - Орел, 1982. - С. 118 - 121.

4. Голенков В. А., Радченко С. Ю., Рябушкин В. И. Совершенствование процесса высадки и модернизация специализированного оборудования // Тез. докл. респ. науч. - техн. конф. Интенсификация производства и повышение качества изделий поверхностным пластическим деформированием, 25 - 29 мая 1989 г. - Тольятти, 1989. - С. 74 - 79.

5. Голенков В. А., Радченко С. Ю., Рябушкин В. И. Совершенствование технологии и оборудования для непрерывно-последовательной высадки // Совершенствование конструирования и технологии производства приборов, машин, механизмов: Сб. науч. - техн. трудов ОФ МИП. - Орел, 1990. - С. 316 - 319.

6. Голенков В. А., Радченко С. Ю. Совершенствование процесса вы-

садки и модернизация специализированного оборудования // Тез. докл. респ. науч. - техн. конф. Прогрессивные материалы, технологии и конструкции в машиностроении и приборостроении. - Калуга, 1990. - С. 90.

7. Голенков В. А., Радченко С. Ю. Совершенствование технологии непрерывно-последовательной высадки с применением роликового формообразующего инструмента // Кузнечно-штамповочное производство. - 1995. - № 10. - С. 15 - 17.

8. Голенков В. А. Разработка технологии и научно-обоснованной методики проектирования процессов ОМД с локальным деформированием заготовки // Перспективные технологии, машины и аппараты в машиностроении и приборостроении: Материалы выездного заседания Головного Совета Машиностроения, февраль 1995 г. - Орел, 1995. - С. 15 - 27.

9. Математическое моделирование на персональном компьютере упруго-пластического состояния при обработке металлов давлением / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, В. И. Кондрашов и др. // Кузнечно-штамповочное производство. - 1996. - № 11. - С. 7 - 9.

10. Голенков В. А., Кондрашов В. И., Зыкова З. П. Математическое моделирование процессов валковой штамповки на ПЭВМ // Совершенствование конструирования и технологии производства приборов, машин и механизмов: Сб. науч. - техн. трудов ОФ МИП. - Орел, 1990. - С. 105 - 107.

11. Голенков В. А., Радченко С. Ю., Дорофеев О. В. Анализ системы привода и модернизация установки валковой штамповки // Сб. науч. трудов ОрелГТУ. Т. 5. - Орел, 1994. - С. 203 - 207.

12. Голенков В. А., Лукьянчиков Ю. П., Афанасьев Е. Г. Особенности изготовления полых осесимметричных деталей приборов методом валковой штамповки // Совершенствование конструирования и технологии производства приборов, машин и механизмов: Сб. науч. трудов ОФ МИП. - Орел, 1990. - С. 160 - 170.

13. Голенков В. А., Лукьянчиков Ю. П., Афанасьев Е. Г. Валковая штамповка точных осесимметричных деталей // Прогрессивные материалы, технологии и конструкции в машиностроении и приборостроении: Сб. науч. - техн. трудов КПИ. - Калуга, 1990. - С. 117 - 119

14. Особенности технологии изготовления тонких осесимметричных деталей приборов / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, Ю. П. Лукьянчиков и др. // Организационно-методические и научные аспекты сотрудничества ОФ МИП с приборостроительными предприятиями: Сб. науч. - техн. трудов ОФ МИП. - Орел, 1991. - С. 150 - 152.

15. Голенков В. А., Радченко С. Ю., Дорофеев О. В. Совершенствование технологии изготовления осесимметричных деталей и разработка

специализированного оборудования // Тез. докл. рег. науч. -техн. конф., апрель 1994 г. - Орел, 1994. - 43 с.

16. Голенков В. А., Радченко С. Ю., Тюков В. М. Пакет прикладных программ для моделирования процессов обработки металлов давлением // Тез. докл. респ. науч. -техн. конф. Металлические материалы, методы их обработки, ноябрь 1994 г. -Москва, 1994. - С. 81.

17. Голенков В. А., Радченко С. Ю., Дорофеев О. В. Новый способ обработки давлением осесимметричных деталей методом валковой штамповки // Тез. докл. респ. науч. -техн. конф. Металлические материалы, методы их обработки, ноябрь 1994 г. -Москва, 1994. - С. 79.

18. Голенков В. А., Радченко С. Ю., Дорофеев О. В. Разработка технологии и методика расчета процессов ОМД с локальным деформированием заготовки // Тез. докл. междунар. науч. -техн. конф. Проблемы пластичности в технологии, апрель 1995 г. - Орел, 1995. - С. 37.

19. Голенков В. А., Радченко С. Ю., Дорофеев О. В. Изготовление осесимметричных изделий валковой штамповкой // Кузнечно-штамповочное производство. - 1995. - № 11. - С. 20 - 23.

20. Моделирование и расчет процессов обработки материалов давлением / В. А. Голенков, З. П. Зыкова, В. И. Кондрашов и др. // Современные технологические и информационные процессы в машиностроении / Междунар. семинар, Орел, октябрь 1993 г. - Орел, 1993. - С. 58 - 61.

21. Голенков В. А., Кондрашов В. И. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением // Энциклопедия машиностроения. Т. 3. Ч. 1. Технологическое проектирование изделий машиностроения и моделирование технологических процессов. -М.: Машиностроение, 1997. - С. 326 - 345.

22. А. с. 794864 СССР, МКИ³ В 21 J 5/08. Устройство для высадки / В. А. Голенков, В. Г. Зимовец, Ю. А. Медников и др. (СССР). - № 2821251/25-27; Заявлено 14.09.79. - д. с. п.

23. А. с. 986032 СССР, МКИ³ В 21 J 5/08. Роликовая матрица / В. Я. Осадчий, В. А. Голенков, Б. А. Егоров (СССР). - № 3228361/25-27; Заявлено 15.06.81. - д. с. п.

24. А. с. 1074646 СССР, МКИ³ В 21 J 5/08; В 21 Н 8/00. Устройство для штамповки с обкаткой / В. Я. Осадчий, В. Г. Зимовец, В. А. Голенков, Б. А. Егоров (СССР). - № 34754007/25-27; Заявлено 23.07.82; Опубл. 23.02.84, Бюл. № 7. - 3 с.: ил.

25. А. с. 1070778 СССР, МКИ³ В 21 J 13/02. Роликовая матрица / В. А. Голенков, Б. А. Егоров, В. А. Марченко, Ю. П. Лукьянчиков (СССР). - № 3475406/25-27; Заявлено 23.07.82. - д. с. п.

26. А. с. 866868 СССР, МКИ³ В 21 J 5/08; В 21 D 41/02. Способ получения утолщений на трубной заготовке / В. А. Голенков, В. Я. Осадчий, В. Г. Зимовец и др. (СССР). - № 2681536/25-27; Заявлено 04.11.78. - д. с. п.

27. А. с. 980343 СССР, МКИ³ В 21 J 5/08. Устройство для высадки / В. Я. Осадчий, В. А. Голенков, П. М. Олин и др. (СССР). - № 3235839/25-27; Заявлено 13.01.81. - д. с. п.

28. А. с. 1406893 СССР, МКИ⁴ В 21 J 5/08. Способ получения утолщений преимущественно на полых заготовках / В. Я. Осадчий, В. А. Голенков, С. Ю. Радченко и др. (СССР). - № 4153956/23-27; Заявлено 24.11.86. - д. с. п.

29. А. с. 1485507 СССР, МКИ⁴ В 21 J 5/08. Способ получения утолщений на трубных заготовках / В. Я. Осадчий, В. А. Голенков, С. Ю. Радченко и др. (СССР). - № 4247627/31-27; Заявлено 18.05.87. - д. с. п.

30. А. с. 1287388 СССР, МКИ⁴ В 21 J 5/08. Устройство для высадки полых цилиндрических заготовок / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, И. В. Коряжкин (СССР). - № 3728321/25-27; Заявлено 19.04.84. - д. с. п.

31. А. с. 1304243 СССР, МКИ⁴ В 21 K 21/08. Способ изготовления изделий со ступенчатой наружной поверхностью / В. А. Голенков, С. В. Котин, С. И. Красников (СССР). - № 3769205/25-27; Заявлено 21.04.84. - д. с. п.

32. А. с. 1600118 СССР, МКИ⁴ В 21 K 21/08. Способ изготовления полых деталей / В. А. Голенков, Ю. П. Лукьянчиков, А. Н. Тройнич, и др. (СССР). - № 4367897/25-27; Заявлено 18.01.88. - д. с. п.

33. А. с. 1472171 СССР, МКИ⁴ В 21 J 13/02. Способ изготовления деталей и устройство для его осуществления / В. Н. Борисенко, В. А. Голенков, В. И. Пилюзин (СССР). - № 4232479/31-27; Заявлено 16.03.87; Опубл. 15.05.89, Бюл. № 14. - 5 с.: ил.

34. А. с. 1515501 СССР, МКИ⁴ В 21 J 13/02. Устройство для штамповки деталей / В. А. Голенков, Ю. П. Лукьянчиков, Е. Г. Афанасьев, и др. (СССР). - № 4367898/31-27; Заявлено 18.01.88. - д. с. п.

35. А. с. 1486276 СССР, МКИ⁴ В 23 D 23/00. Штамп для резки пруткового материала / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, Ю. П. Лукьянчиков, и др. (СССР). - № 4288467/31-27; Заявлено 27.07.87; Опубл. 15.06.89, Бюл. № 22. - 3 с.: ил.

36. А. с. 1719164 СССР, МКИ⁴ В 23 D 23/00. Штамп для резки пруткового материала / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, Ю. П. Лукьянчиков, и др. (СССР). - № 4760286/27; Заявлено 20.11.89; Опубл. 15.03.92, Бюл. № 10. - 4 с.: ил.

37. Пат. 2015863 РФ, МКИ⁴ В 23 D 23/00. Штамп для резки пруткового материала / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, Ю. П. Лукьянчиков, и др. (РФ). - № 5046050/27; Заявлено 04.06.92; Оpubл. 15.07.94, Бюл. № 13. - 3 с.: ил.

38. А. с. 1070778 СССР, МКИ³ В 21 J 13/02. Роликовая матрица / В. А. Голенков, Б. А. Егоров, В. А. Марченко, Ю. П. Лукьянчиков (СССР). - № 3475406/25-27; Заявлено 23.07.82. - д. с. п.

39. А. с. 1622072 СССР, МКИ⁴ В 21 К 1/68. Способ изготовления ступенчатых деталей / В. А. Голенков, Ю. П. Лукьянчиков Е. Г. Афанасьев и др. (СССР). - № 4365557/27; Заявлено 18.01.88; Оpubл. 23.01.91, Бюл. № 3. - 4 с.: ил.