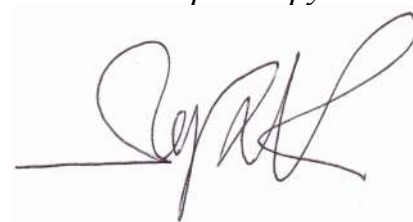


На правах рукописи



НГУЕН КУОК ХУИ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК**

**Специальность 05.02.09 - Технологии и машины обработки
давлением**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Яковлев Сергей Сергеевич

Официальные оппоненты: Сосенушкин Евгений Николаевич,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВПО «МГТУ «СТАНКИН» (г. Москва), про-
фессор кафедры «Системы пластического де-
формирования».

Травин Вадим Юрьевич, кандидат техниче-
ских наук, ОАО «НПО «СПЛАВ» (г. Тула),
зам. главного конструктора.

Ведущая организация - ФГБОУ ВПО «Государственный универси-
тет—учебно-научно-производственный ком-
плекс» (г. Орел).

Защита состоится «15» сентября 2015 г. в 14-00 час. на заседании диссер-
тационного совета Д 212.271.01 при ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет» (300012, г. Тула, ГСП, просп. Ленина, д. 92, 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:
<http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/nguen-kh/>

Автореферат разослан «24» июня 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные тенденции развития различных отраслей промышленности характеризуются резким повышением требований к качеству и эксплуатационным свойствам изделий при снижении себестоимости их производства. Это стимулирует разработку высокоэффективных технологий, отвечающих указанным требованиям и реализующих экономию материальных и энергетических ресурсов, трудовых затрат.

Одним из путей повышения эффективности процессов холодной объемной штамповки является совмещение ряда технологических операций в одном переходе. К числу таких процессов относится совмещение операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания толстостенных трубных заготовок, которое позволяет значительно увеличить эффективность получения детали переменного диаметра и толщины стенки за счет повышения коэффициента использования материала и снижения трудоемкости последующих доводочных работ. Использование совмещения операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания для изготовления полых сложнопрофильных осесимметричных деталей из трубных заготовок позволяет обеспечить соединение труб с разными диаметрами - переходниками.

В настоящее время разработка технологических процессов изготовления полых сложнопрофильных осесимметричных деталей из толстостенных трубных заготовок ($D_0/s_0 < 10...15$, где D_0 и s_0 – наружный диаметр и толщина трубной заготовки) должна проводиться с минимальными сроками освоения выпуска продукции. Это возможно только при использовании современных методов подготовки производства, требующих применения более совершенных математических моделей, описывающих процессы деформирования материалов, и достижений вычислительной техники. В связи с этим, широкое использование прикладного программного комплекса Qform 2D/3D при моделировании операций обработки металлов давлением (ОМД) для изготовления полых сложнопрофильных осесимметричных деталей из толстостенных трубных заготовок является перспективным направлением изучения операций ОМД, позволяющей назначить рациональные технологические параметры.

Теоретическое обоснование рациональных технологических режимов совмещения операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания на одной рабочей позиции толстостенных трубных заготовок, обеспечивающих снижение металлоемкости, трудоемкости изготовления, сокращения сроков подготовки производства и повышения эксплуатационных характеристик, является **актуальной задачей**.

Работа выполнялась в соответствии с государственными контрактами в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы Минобрнауки РФ, грантами РФФИ, научно-технической программой Министерства образования и науки Российской Федерации «Развитие научного потенциала высшей школы», государственным контрактом Министерства образования и науки Российской Федерации.

Цель работы. Повышение эффективности совмещения операций обжима, обжима с утонением и выдавливания толстостенных трубных заготовок на одной рабочей позиции путем теоретического обоснования рациональных технологических режимов пластического деформирования с использованием компь-

ютерного моделирования в среде прикладного программного комплекса Qform 2D/3D на базе метода конечных элементов (МКЭ).

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи исследований**:

1. Исследование совмещенной модели операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания на одной рабочей позиции толстостенных трубных заготовок из низкоуглеродистых сталей методом компьютерного моделирования на базе МКЭ.

2. Анализ технологических условий обработки при совмещении операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания на одной рабочей позиции толстостенных трубных заготовок из низкоуглеродистых сталей.

3. Разработка рекомендаций по проектированию технологических процессов изготовления сложнопрофильных осесимметричных деталей из толстостенных трубных заготовок операциями обжима, обжима с утонением, обратного выдавливания и их совмещения на одной рабочей позиции.

4. Использование результатов исследований в промышленности и в учебном процессе.

Объект исследования. Процессы пластического деформирования трубных заготовок.

Предмет исследования. Операции обжима, обжима с утонением, совмещение операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания толстостенных трубных заготовок путем компьютерного моделирования на базе МКЭ.

Методы исследования. Теоретические исследования операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания толстостенных трубных заготовок выполнены с использованием основных положений теории пластичности упругопластического, несжимаемого, упрочняющегося материала в программном комплексе Qform 2D/3D. Для создания моделей геометрии заготовки, рабочего инструмента и штампа использованы программные комплексы КОМПАС 3D v.13 и SOLIDWORKS 2010. Рациональные технологические параметры исследованных операций пластического деформирования оценивались по силовым режимам, коэффициентам неоднородности распределения интенсивности напряжений и деформаций по толщине сложнопрофильной осесимметричной детали, а также по распределению интенсивности напряжений и деформаций по толщине детали.

Автор защищает:

- предложенную технологическую схему совмещения операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания на одной рабочей позиции толстостенных трубных заготовок на основе использования результатов моделирования;

- установленные количественные зависимости влияния технологических параметров (коэффициента трения на контактных поверхностях рабочего инструмента и заготовки, коэффициента обжима, коэффициента утонения, угла конусности матрицы, степени деформации) на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния, неоднородности распределения интенсивности напряжений и деформаций по толщине сложнопрофильной осесимметричной детали, силовые режимы исследуемых операций пластического деформирования;

- результаты сравнения теоретических и экспериментальных исследова-

ний, полученных другими авторами, по силовым режимам операций обжима и обжима с утонением стенки трубных заготовок из стали 10;

- разработанные рекомендации по проектированию технологических процессов изготовления сложнопрофильных осесимметричных деталей из толстостенных трубных заготовок операциями обжима, обжима с утонением, обратного выдавливания и их совмещения на одной рабочей позиции, обеспечивающих заданное качество их изготовления, уменьшение трудоемкости и металлоемкости деталей, сокращение сроков подготовки производства новых изделий;

- предложенную технологическую схему изготовления сложнопрофильных осесимметричных деталей «переходник» из толстостенных трубных заготовок совмещением операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливанием на одной рабочей позиции.

Личное участие автора в получении результатов исследований: предложена технологическая схема совмещения операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания на одной рабочей позиции толстостенных трубных заготовок на основе использования результатов моделирования; выявлены закономерности влияния технологических параметров на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния, неоднородности распределения интенсивности напряжений и деформаций по толщине сложнопрофильной осесимметричной детали, силовые режимы исследуемых операций пластического деформирования; разработаны рекомендации по проектированию технологических процессов изготовления сложнопрофильных осесимметричных деталей из толстостенных трубных заготовок операциями обжима, обжима с утонением, обратного выдавливания на одной рабочей позиции; разработана технологическая схема изготовления сложнопрофильных осесимметричных деталей из толстостенных трубных заготовок.

Научная новизна. Определено распределение интенсивности напряжений и деформаций по толщине сложнопрофильной осесимметричной детали и силовых режимов при выполнении совмещения операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания толстостенных трубных заготовок, протекающих в условиях объемного напряженного и деформированного состояний. Выявлено, что течение материала может реализовываться по двум вариантам в зависимости от величин технологических параметров.

Практическая значимость. Разработаны рекомендации по расчету технологических параметров операций обжима, обжима с утонением стенки и совмещения операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания толстостенных трубных заготовок на одной рабочей позиции на основе моделирования этих операций с применением программного комплекса QForm 2D/3D.

Реализация работы. Разработанные рекомендации по расчету технологических параметров для изготовления сложнопрофильных осесимметричных деталей были востребованы в опытном производстве на ОАО «ТНИТИ» (г. Тула) при проектировании технологических процессов, инструмента и оснастки для изготовления деталей «переходник» совмещением операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания на одной рабочей позиции из толстостенных трубных заготовок из стали 10. Эффективность разработанных технологических процессов связана с сокращением сроков подготовки производства, уменьшением металлоемкости заготовок, трудоемкости изготовления деталей, повышением их качества за счет отказа от доводочных работ. Отдельные

результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров направления 150700 «Машиностроение» профиля «Машины и технология обработки металлов давлением», а также в научно-исследовательской работе студентов, при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Апробация работы. Результаты исследований доложены на Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (г. Тула, 2014 г.); на ежегодных международных научно-технических конференциях «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (АПИР – 16, АПИР – 18, г. Тула, ТулГУ, 2012 – 2014 гг.), на научно-практических конференциях «Молодежные инновации» Тульского государственного университета (г. Тула, 2014 г.), а также на ежегодных НТК профессорско-преподавательского состава ТулГУ в 2010 – 2015 гг.

Публикации. Материалы проведенных исследований отражены в 10 статьях в рецензируемых изданиях, внесенных в «Перечень утвержденных ВАК Российской Федерации изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней»; 3 статьях в международных сборниках научных трудов, 3 тезисах докладов на региональных и всероссийских научно-технических конференциях, общим объемом 7,12 п.л.; из них авторских – 5,7 п.л. Автор выражает глубокую благодарность канд. техн. наук, доценту В.А. Короткову за оказанную помощь при выполнении работы, критические замечания и рекомендации.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения и пяти разделов, заключения, списка использованных источников из 192 наименований, 2 приложений и включает 120 страниц машинописного текста, содержит 101 рисунок и 6 таблиц. Общий объем – 182 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой в работе задачи, ее научная новизна, практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту, и краткое содержание разделов диссертации.

В первом разделе изложено современное состояние теории и технологии операций обжима, обжима с утонением и выдавливания трубных заготовок, приведен обзор программного комплекса Qform 2D/3D, а также показаны технологические возможности операций пластического деформирования и пути его интенсификации.

Значительный вклад в развитие теории пластичности и методов анализа процессов обработки металлов давлением материалов, операций обжима, обжима с утонением и выдавливания внесли Ю.А. Алюшин, А.А. Богатов, С.И. Вдовин, В.Д. Головлев, Ф.В. Гречников, С.И. Губкин, Г.А. Данилин, Г.Д. Дель, А.М. Дмитриев, А.К. Евдокимов, С.А. Евсюков, А.А. Ильюшин, Л.М. Качанов, В.Л. Колмогоров, Х. Кудо, В.Д. Кухарь, Н.Н. Малинин, А.Д. Матвеев, В.Г. Шеркунов, Н.А. Шестаков, А.Г. Овчинников, В.А. Огородников, С.С. Одинг, Е.А. Попов, И.П. Ренне, В.П. Романовский, Ф.И. Рузанов, Е.И. Семенов, Е.Н. Сосенушкин, Л.Г. Степанский, А.Д. Томленов, Е.П. Унксов, Р. Хилл, С.П. Яковлев и др. В трудах этих ученых разработаны и усовершенствованы методы анализа процессов пластического формоизменения, даны примеры их применения к анализу процессов обработки металлов давлением.

Проведен анализ существующих технологических процессов изготовления сложнопрофильных, осесимметричных деталей из трубных заготовок.

Существующие способы получения изделий в виде полых сложнопрофильных осесимметричных деталей, конусов, фланцев и т.д., имеющих большое центральное отверстие, характеризуются большим отходом металла, дальнейшее использование которого затруднительно.

Несмотря на большое количество работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям операций обжима, обжима с утонением и выдавливания, вопросы моделирования перечисленных выше операций толстостенных трубных заготовок, протекающих в условиях объемного напряженного и деформированного состояний, в настоящее время практически не разработаны. Большинство работ посвящено теоретическим исследованиям операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания тонкостенных трубных заготовок, протекающих в условиях плоского напряженного и плоского деформированного состояний. Мало внимания уделяется в научно-технической литературе исследованиям напряженного и деформированного состояний, кинематики течения материала, силовых режимов операций обжима, обжима с утонением, обратного выдавливания и их совмещения на одной рабочей позиции толстостенных трубных заготовок.

Показано, что применение программного комплекса Qform 2D/3D на базе метода конечных элементов для теоретического анализа процессов пластического осесимметричного формоизменения в настоящее время наиболее перспективно.

При разработке технологических процессов, построенных на совмещении операций обжима, обжима с утонением и выдавливания тонкостенных трубных заготовок на одной рабочей позиции, в основном используют эмпирические зависимости из различных справочных материалов, которые не учитывают многие практически важные параметры. Во многих случаях это приводит к необходимости экспериментальной отработки этих процессов, что удлиняет сроки подготовки производства изделия. Широкий круг вопросов, связанных с проектированием технологических процессов обжима, обжима с утонением и выдавливания и их совмещения на одной рабочей позиции толстостенных трубных заготовок и отысканием рациональных условий ведения этих процессов, обеспечивающих изготовление изделий заданного качества, не решен.

Во втором разделе приведены результаты математического моделирования операции обжима толстостенных трубных заготовок с применением компьютерного моделирования на базе МКЭ. Показано влияние технологических параметров на напряженное и деформированное состояния, силовые режимы, неоднородность распределения интенсивности напряжений и деформаций по толщине сложнопрофильных осесимметричных деталей, изготавливаемых операцией обжима трубных заготовок.

Для исследования операции обжима толстостенных трубных заготовок используется модель, которая представляет собой полу осесимметричную заготовку в формате 3D. Для моделирования выбран программный комплекс Qform 2D/3D v. 7, позволяющий моделировать процессы объемной штамповки с использованием 3D конечных элементов пирамидальной формы.

Теоретические исследования операции обжима выполнены для трубных заготовок из стали 10 ($\sigma_T = 210 \text{ МПа}$) диаметром 80 мм, толщиной стенки 6 мм, высотой 130 мм в конической матрице с углом конусности матрицы $\alpha = 10; 20$

и 30^0 при коэффициентах трения на контактной поверхности заготовки и рабочего инструмента $\mu = 0,1; 0,15$ и $0,2$ и коэффициентах обжима $m_{об} = 0,6; 0,7$ и $0,8$.

Графические зависимости изменения относительной силы операции обжима $\bar{P} = P/(\pi d_{cp} s_0 \sigma_T)$ от относительной величины перемещения пуансона $\bar{h} = h/s_0$ при $\alpha = 10^0$; $m_{об} = 0,6$ и $\mu = 0,1$ приведены на рис. 1. Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 1, показывает, что изменение относительной величины силы обжима можно условно разделить на 2 стадии. На первой стадии (I) подгибается краевая часть заготовки, которая скользит по конической поверхности матрицы, а сила операции обжима увеличивается плавно (нестационарная стадия). На второй стадии (II) осуществляется стационарная стадия операции обжима трубной заготовки с образованием цилиндрического участка (сила операции остается постоянной).

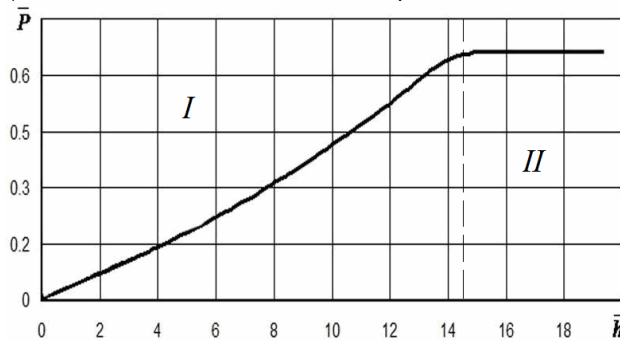


Рис. 1. Зависимости изменения \bar{P} от \bar{h}

Установлено, что с увеличением коэффициента обжима $m_{об}$ от $0,6$ до $0,8$ максимальная относительная величина $\bar{P}_{max} = P_{max}/(\pi d_{cp} s_0 \sigma_T)$ уменьшается на $25...30\%$. Выявлено существование рациональных углов конусности матрицы α в диапазоне $15...25^0$, соответствующих минимальной относительной величине \bar{P}_{max} (рис. 2). Установлено также, что с ростом коэффициента трения μ и уменьшением коэффициента обжима $m_{об}$ максимальная относительная величина силы \bar{P}_{max} возрастает.

Показано, что с увеличением коэффициента трения μ от $0,1$ до $0,2$ максимальная относительная величина силы $\bar{P}_{max} = \max(\bar{P})$ повышается на $35...45\%$.

Выявлено влияние технологических параметров (коэффициента трения на контактных поверхностях рабочего инструмента и заготовки, коэффициента обжима, коэффициента утонения, угла конусности матрицы, степени деформации) на неоднородность распределения интенсивности напряжений, средних напряжений и деформаций по толщине сложнопрофильных осесимметричных деталей, изготовленных операциями обжима.

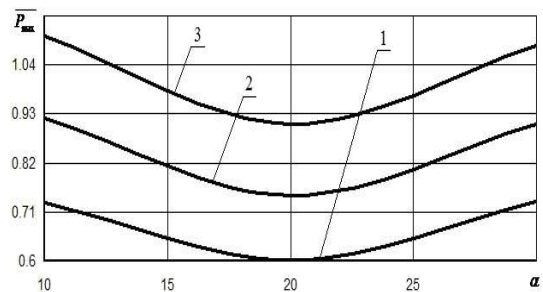


Рис. 2. Зависимости изменения \bar{P}_{max} от α : кривая 1 - $\mu = 0,1$; кривая 2 - $\mu = 0,15$; кривая 3 - $\mu = 0,2$

Для оценки напряженного и деформированного состояний при обжиге трубной заготовки были рассмотрены области, выделенные элементами №1(P_0), №2(P_1) и №3(P_2), соответствующие внутренней, свободной и контактной поверхностям трубной заготовки.

Анализ развития пластической области показывает, что распределение напряжений сосредоточено на угле закругления матрицы и неравномерно распределено по толщине детали. Неоднородность распределения средних напряжений по толщине трубной заготовки σ оценивалась коэффициентом неоднородности величины средних напряжений k_σ и коэффициентом неоднородности величины интенсивности напряжений $k_{\sigma i}$:

$$k_\sigma = (|\sigma_{\max}| - |\sigma_{\min}|) / |\sigma_{cp}|; \quad (1)$$

$$k_{\sigma i} = (\sigma_{i \max} - \sigma_{i \min}) / \sigma_{i cp}, \quad (2)$$

где $|\sigma_{\max}|$, $|\sigma_{\min}|$, $|\sigma_{cp}|$ - соответственно абсолютная максимальная, минимальная и средняя величины средних напряжений; $\sigma_{i \max}$, $\sigma_{i \min}$, $\sigma_{i cp}$ - соответственно максимальная, минимальная и средняя величины интенсивности напряжений.

Неоднородность распределения степени деформации по толщине трубной заготовки оценивалась коэффициентом неоднородности степени деформации:

$$k_\varepsilon = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}) / \varepsilon_{cp}, \quad (3)$$

где ε_{\max} , ε_{\min} , ε_{cp} - соответственно максимальная, минимальная и средняя величины степени деформации.

Установлено влияние технологических параметров (коэффициента обжима $m_{об}$, угла конусности матрицы α), коэффициента трения μ на величины коэффициентов неоднородности распределения средних напряжений k_σ , интенсивности напряжений $k_{\sigma i}$ и степени деформации k_ε по толщине детали. Выявлена существенная неоднородность распределения средних напряжений k_σ , интенсивности напряжений $k_{\sigma i}$ и степени деформации k_ε по толщине детали, которая составляет 15...35 %.

В третьем разделе изложены результаты математического моделирования операции обжима с утонением толстостенных трубных заготовок с применением программного комплекса QForm 2D/3D. Выявлено влияние технологических параметров на напряженное и деформированное состояния, силовые режимы, а также неоднородность распределения интенсивности напряжений и деформаций по толщине сложнопрофильных осесимметричных деталей, изготавливаемых операцией обжима с утонением трубных заготовок.

Моделирование выполняется из стали 10 ($\sigma_T = 210 \text{ МПа}$) при следующих исходных параметрах трубной заготовки: диаметр заготовки 80 мм, толщина 6 мм, высота 130 мм в конической матрице с углами конусности матрицы $\alpha = 10$; 20 и 30⁰; коэффициенты трения на поверхностях контакта $\mu = 0,1$; 0,15 и 0,2; коэффициенты обжима $m_{об} = 0,6$; 0,7 и 0,8 и коэффициенты утонения $m_{ум} = 0,8$; 0,9 и 1,0.

Графическая зависимость изменения относительной силы операции обжима с утонением стенки трубной заготовки $\bar{P} = P / (\pi d_{cp} s_0 \sigma_T)$ от относитель-

ной величины перемещения пуансона $\bar{h} = h/s_0$ ($\alpha = 20^0$; $m_{об} = 0,7$; $m_{ум} = 0,95$ и $\mu = 0,1$) приведена на рис. 3. Анализ графических зависимостей изменения относительной величины силы $\bar{P} = P / (\pi s_0 d_{cp} \sigma_T)$ от относительной величины перемещения $\bar{h} = h/s_0$ (рис. 3) показывает, что операция обжима с утонением толстостенных трубных заготовок может быть условно разделена на три стадии.

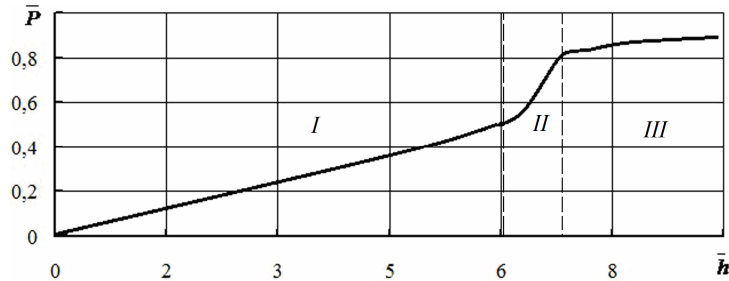


Рис. 3. Зависимость изменения \bar{P} от \bar{h}

На первой стадии (I) операции обжима с утонением трубная заготовка обжимается на конической поверхности матрицы. Относительная величина силы операции \bar{P} плавно увеличивается с ростом относительной величины перемещения \bar{h} . На второй стадии (II) операции обжима с утонением трубных заготовок осуществляется формирование зоны утонения. На этой стадии относительная величина силы операции \bar{P} резко увеличивается по мере формирования зоны утонения (с ростом относительной величины перемещения \bar{h}). На третьей стадии (III) реализуется собственно операция обжима с утонением, а относительная величина силы операции \bar{P} остается постоянной величиной.

Анализ результатов расчетов показывает, что с увеличением значения коэффициента утонения $m_{ум}$ от 0,8 до 1,0 относительная величина силы обжима с утонением стенки \bar{P} уменьшается более чем на 35...45 %. Выявлено существование рациональных углов конусности матрицы α в диапазоне $12...24^0$, соответствующих минимальной величине относительной силы \bar{P} на третьей стадии операции обжима с утонением. Установлено, что с ростом величины коэффициента трения μ от 0,1 до 0,2 максимальная относительная величина силы \bar{P} увеличивается на 35...45 %.

Рассмотрено напряженное и деформированное состояния в характерных трех точках P_0, P_1, P_2 , соответствующие внутренней, свободной (утонения) и контактной поверхностям рабочего инструмента и трубной заготовки. Анализ распределения напряжений и деформаций по толщине трубной заготовки при обжиме с утонением стенки и коэффициентов неоднородности распределения средних напряжений k_{σ} , интенсивности напряжений $k_{\sigma i}$ и степени деформации k_{ϵ} показывает, что данные величины распределены неоднородно по толщине детали и изменяются на 5...35 % в зависимости от рассмотренных слоев заготовки и различных сочетаний технологических параметров.

В четвертом разделе приведены результаты компьютерного моделирования совмещения операций обжима, обжима с утонением и выдавливания толстостенных трубных заготовок; установлены закономерности изменений силовых режимов, распределений напряжений и деформаций по толщине детали

при совмещении операций обжима, обжима с утонением стенки и выдавливания толстостенных трубных заготовок.

Моделирование выполнялось на трубных заготовках из стали 10 ($\sigma_T = 210 \text{ МПа}$): диаметр заготовки 134 мм, толщина 14 мм, высота 170 мм в конической матрице с углами конусности $\alpha = 10, 20$ и 30° ; коэффициенты трения $\mu = 0,1; 0,15; 0,2$; коэффициенты обжима $m_{об} = 0,7; 0,8; 0,9$; коэффициенты утонения $m_{ум} = 0,8; 0,9; 1$; глубина выдавливания $h = 10 \text{ мм}$ и степени деформации поперечного сечения $E = 67,5; 70; 72,5; 75; 77,5 \%$ в среде программы Qform 2D/3D v.7.

При совмещении операций обжима, обжима с утонением и выдавливания трубных заготовок течение материала может протекать по двум вариантам в зависимости от величин технологических параметров:

1. По первому варианту ($E=67,5 \%$) происходит последовательность операций: операция обжима - операция выдавливания - операция утонения (рис. 4, а);

2. По второму варианту ($E=72,5 \%$) происходит последовательность операций: операция обжима - операция утонения – операция выдавливания (рис. 4, б).

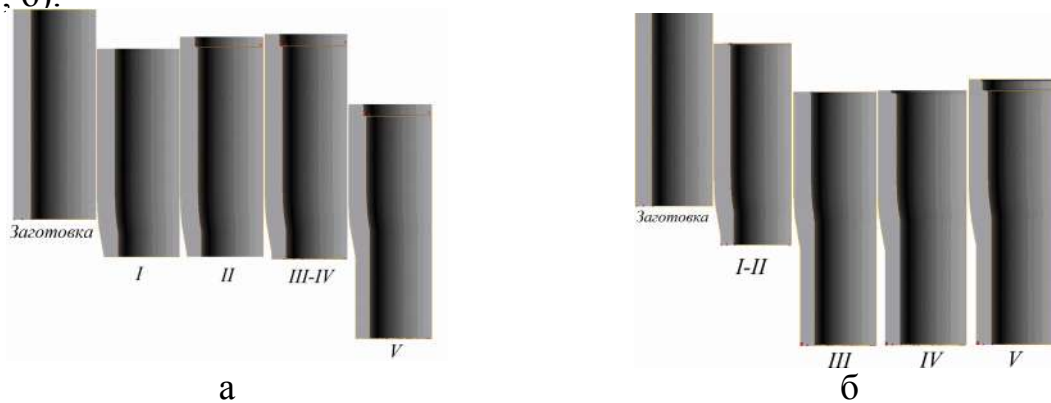


Рис. 4. Вид заготовки на стадии при совмещении операций обжима, обжима с утонением и выдавливания толстостенных трубных заготовок

$$(m_{об} = 0,9; m_{ум} = 0,8; \alpha = 10^\circ; \mu = 0,1)$$

Графические зависимости изменения относительной величины силы $\bar{P} = P / (\pi d_{cp} s_0 \sigma_T)$ при совмещении операций обжима, обжима с утонением и выдавливания толстостенных трубных заготовок на одной рабочей позиции от относительной величины перемещения представлены на рис. 5. Например, анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 5, а, показывает, что изменение относительной величины силы \bar{P} при совмещении операций обжима, обжима с утонением и выдавливания может условно разделиться на 5 стадий. На первой стадии (I) операций обжима с утонением и выдавливания трубная заготовка обжимается на конической поверхности матрицы. В этой стадии относительная величина силы операций \bar{P} плавно увеличивается с ростом относительной величины перемещения \bar{h} . На второй стадии (II) операций реализуется операция выдавливания. На этой стадии относительная величина силы \bar{P} резко увеличивается с ростом относительной величины перемещения \bar{h} . На третьей стадии (III) осуществляется формирование зоны утонения, и относительная ве-

личина силы операции \bar{P} увеличивается по мере формирования зоны утонения, а далее остается постоянной величиной с ростом относительной величины перемещения \bar{h} .

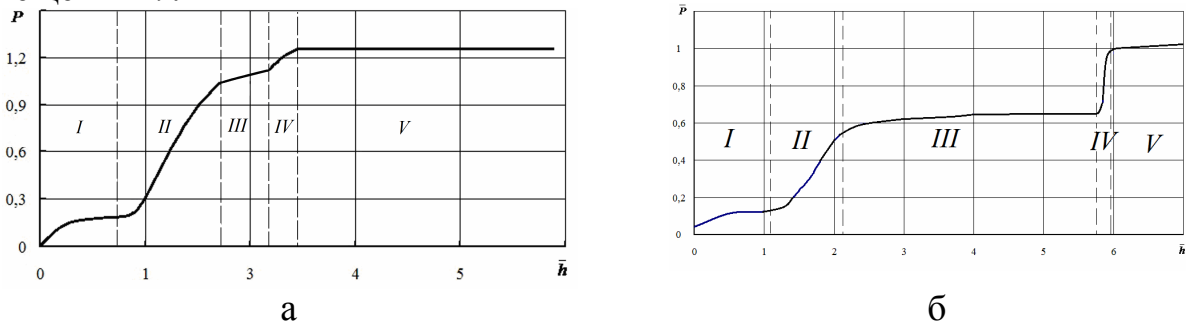


Рис. 5. Зависимости изменения \bar{P} от \bar{h} ($m_{об} = 0,9$; $m_{ум} = 0,8$; $\alpha = 10^0$; $\mu = 0,1$):
а – вариант 1 ($E = 67,5\%$); б – вариант 2 ($E = 72,5\%$).

На следующей стадии (IV) осуществляются операции обжима с утонением и выдавливания трубной заготовки. Относительная величина силы операции интенсивно увеличивается с ростом относительной величины перемещения \bar{h} . На конечной стадии (V) реализуется операция обжима с утонением, и относительная величина силы операции \bar{P} остается постоянной величиной. Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 5, б, аналогичен предыдущим рассуждениям.

Анализ результатов расчетов показывает, что с ростом коэффициента трения μ от 0,1 до 0,2 максимальная относительная величина силы \bar{P} увеличивается на 30...40 %.

Установлено, что с ростом коэффициента утонения $m_{ум}$ от 0,8 до 1,0 максимальная относительная величина силы \bar{P} увеличивается на 45...50 %. Выявлено, что с увеличением коэффициента обжима $m_{об}$ от 0,7 до 0,9 максимальная относительная величина силы \bar{P} уменьшается на 75...85 %. Установлены также рациональные углы в диапазоне $12...20^0$, соответствующие минимальной относительной величине силы операции. Выявлено, что с увеличением степени деформации при выдавливании E от 67,5 до 77,5% максимальная относительная величина силы \bar{P} повышается на 40...50 %.

Для оценки напряженного и деформированного состояний при совмещении операций обжима, обжима с утонением стенки и выдавливания толстостенных трубных заготовок были рассмотрены характерные точки в очаге пластической деформации. Характерные четыре точки P_0, P_1, P_2 , соответствующие средней части детали, внутренней поверхности, контактной поверхности рабочего инструмента и трубной заготовки, и P_3 - зоне выдавливания. Анализ результатов расчетов показывает, что наибольшие значения напряжений сосредоточены в элементах, прошедших через зону утонения и выдавливания, наибольшие значения степени деформаций в элементах, прошедших через зону выдавливания. Величины коэффициентов неоднородности распределения средних напряжений k_{σ} , интенсивности напряжений $k_{\sigma i}$ и степени деформации k_{ϵ} изменяются на 25...55 % в зависимости от рассмотренных слоев заготовки и различных сочетаний технологических параметров.

В пятом разделе диссертационной работы выполнено сравнение теоретических данных по силовым режимам операций обжима, обжима с утонением из стали 10 и экспериментальных, опубликованных в работах других авторов. Установлено, что расчетные величины силы превышают экспериментальные значения не более чем на 5...10 %.

Разработаны рекомендации по проектированию технологических процессов изготовления сложнопрофильных осесимметричных деталей из толстостенных трубных заготовок при $D_0/s_0 < 10...15$ совмещением операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливанием на одной рабочей позиции на основе моделирования этих операций с применением программного комплекса Qform 2D/3D, которые были востребованы в опытом производстве на ОАО «ТНИТИ» (г. Тула) при проектировании технологических процессов, инструмента и оснастки для изготовления деталей «переходник» совмещением операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания на одной рабочей позиции из толстостенных трубных заготовок из стали 10. Предлагаемая технологическая операция обеспечивает уменьшение трудоемкости изготовления детали «переходник» в 1,1...1,2; повышение прочности деталей в 1,2...1,3 раза; уменьшение металлоемкости заготовок на 5...10 %. Толстостенная трубная заготовка и деталь «переходник» приведены на рис. 6.

Отдельные результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе на кафедре «Механика пластического формоизменения» в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

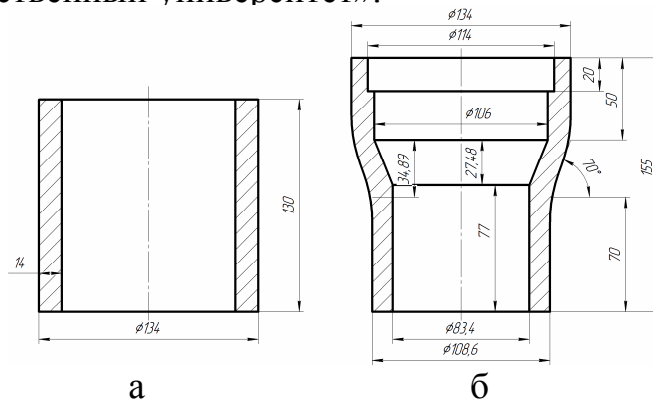


Рис. 6. Схемы заготовки (а) и детали «переходник» (б)

В заключении приводятся основные результаты и выводы по выполненной работе.

В приложениях содержатся акты внедрения полученных результатов диссертационной работы в промышленности и учебном процессе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе **решена актуальная научно-техническая задача**, состоящая в теоретическом обосновании рациональных технологических режимов совмещения операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания на одной рабочей позиции толстостенных трубных заготовок на основе моделирования этих операций с применением компьютерного моделирования на базе МКЭ, обеспечивающих снижение металлоемкости, трудоемкости изготовления, сокращения сроков подготовки производства и повышения эксплуатационных характеристик

В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие **основные результаты и сделаны выводы**:

1. Выполнено моделирование операций обжима, обжима с утонением и совмещения операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания на одной рабочей позиции толстостенных трубных заготовок из изотропных материалов с применением компьютерного моделирования на базе МКЭ.

2. Выявлено влияние технологических параметров (коэффициента трения на контактных поверхностях рабочего инструмента и заготовки, коэффициента обжима, коэффициента утонения, угла конусности матрицы, степени деформации) на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния, неоднородности распределения интенсивности напряжений и деформаций по толщине сложнопрофильной осесимметричной детали, силовые режимы исследуемых операций пластического деформирования трубных заготовок из стали 10.

3. Установлено, что при совмещении операций обжима, обжима с утонением и выдавливания трубных заготовок течение материала может реализовываться по двум вариантам в зависимости от значений технологических параметров. По первому варианту наблюдается последовательность операций: операция обжима - операция выдавливания - операция утонения; по второму варианту: операция обжима - операция утонения – операция выдавливания. Показано, что с ростом коэффициента трения от 0,1 до 0,2 максимальная относительная величина силы увеличивается на 30...40 %; с ростом коэффициента утонения от 0,8 до 1,0 максимальная относительная величина силы уменьшается на 45...50 %. Выявлено, что с увеличением коэффициента обжима от 0,7 до 0,9 максимальная относительная величина силы уменьшается на 75...85 %. Отмечено существование рациональных углов в диапазоне $12...24^{\circ}$, соответствующих минимальной относительной величине силы операций обжима и обжима с утонением. Для совмещения операций этот диапазон составляет $10...20^{\circ}$. Установлено, что с увеличением степени деформации при выдавливании от 67,5 до 77,5 % максимальная относительная величина силы повышается на 45...50 %.

4. Выполнена оценка напряженного и деформированного состояний при совмещении операций обжима, обжима с утонением стенки и выдавливания толстостенных трубных заготовок. Величины коэффициентов неоднородности распределения средних напряжений, интенсивности напряжений и степени деформации изменяются на 25...55 % в зависимости от рассмотренных слоев заготовки и различных сочетаний технологических параметров.

5. Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных по силовым режимам операций обжима, обжима с утонением из стали 10, опубликованных в работах других авторов. Установлено, что расчетные величины силы превышают экспериментальные значения силы не более чем на 5...10 %.

6. Разработаны рекомендации по проектированию технологических процессов изготовления сложнопрофильных осесимметричных деталей из толстостенных трубных заготовок совмещением операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания на одной рабочей позиции. Эти рекомендации использованы на ОАО «ТНИТИ» (г. Тула) при проектировании технологических процессов, инструмента и оснастки для изготовления деталей «переходник» совмещением операций обжима, обжима с утонением и обратного выдавливания на одной рабочей позиции из толстостенных трубных заготовок из стали 10. Предлагаемая технологическая операция обеспечивает уменьшение тру-

доемкости изготовления детали «переходник» в 1,1...1,2 раза; повышение прочности деталей в 1,2...1,3 раза; уменьшение металлоемкости заготовок на 5...10 %.

7. Отдельные результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе на кафедре «Механика пластического формоизменения» в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», которые введены в раздел дисциплины «Теория обработки металлов давлением».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Нгуен К.Х., Басалаев Э. П. Экспериментальные исследования процесса обжима полых цилиндров в конической матрице // Материалы Международной научно-технической конференции «АПИР-16: Автоматизация: проблемы, идеи, решения» // Вестник ТулГУ. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Ч. 2. С. 14-18.

2. Нгуен К.Х., Басалаев Э. П. Технология процессов обжима и раздачи заготовки полых цилиндров // Материалы Международной научно-технической конференции «АПИР-16: Автоматизация: проблемы, идеи, решения» // Вестник ТулГУ. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Ч. 2. С. 18-21.

3. Нгуен К.Х., Басалаев Э. П., Басалаев Д.Э. Моделирование процесса обжима полых цилиндров с помощью программы DEFORM – 3D // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 6. Ч. 2. С. 264- 269.

4. Нгуен К.Х. Штамповка полых цилиндров с переменными диаметром и толщиной стенки // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «АПИР-18: Автоматизация: проблемы, идеи, решения» // Вестник ТулГУ. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. С. 187-191.

5. Нгуен К.Х., Яковлев С.С. Исследование силовых режимов процесса обжима цилиндрических заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 4. С. 64-69.

6. Нгуен К.Х., Митин О.Н., Нуждин Г.А. Моделирование операции обжима с утонением толстостенных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 5. С. 57-65.

7. Нгуен К.Х., Митин О.Н., Нуждин Г.А. Закономерности влияния технологических параметров на неоднородность распределения напряжений по толщине детали при обжиме толстостенных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 6. С. 46-53.

8. Нгуен К.Х. Моделирование операции обжима с утонением стенки полых цилиндров на базе МКЭ // VIII региональная молодежная научно-практическая конференция ТулГУ «Молодежные инновации». Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Секция «Технические науки». Ч. 1. С. 181-183.

9. Нгуен К.Х. Математическое моделирование операции обжима с утонением стенки полных цилиндров // VIII региональная молодежная научно-практическая конференция ТулГУ «Молодежные инновации». Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Секция «Технические науки». Ч. 1. С. 183-185.

10. Нгуен К.Х., Яковлев С.С., Митин О.Н. Неоднородность распределения деформаций по толщине детали при обжиме толстостенных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ,

2014. Вып. 7. С. 10-15.

11. Нгуен К. Х., Митин О.Н. Неоднородность распределения напряжений по толщине детали при обжиге с утонением толстостенных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 10. С. 98-107.

12. Нгуен К. Х., Митин О.Н. Закономерности технологических параметров на неоднородность распределения деформаций по толщине детали при обжиге с утонением // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 10. С. 163-169.

13. Нгуен К.Х., Митин О.Н., Нуждин Г.А. Моделирование совмещения операций обжига с утонением и выдавливания толстостенных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 11. Ч. 2. С. 87-95.

14. Нгуен К.Х. Исследование изменения силовых режимов при обжиге толстостенных трубных заготовок от технологических параметров // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации». Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 35-38.

15. Нгуен К.Х., Митин О.Н. Закономерности влияния технологических параметров на неоднородность распределения напряжений по толщине детали при совмещении операций обжига, обжига с утонением и выдавливания // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 12. Ч. 2. С. 326-337.

16. Нгуен К. Х., Митин О.Н., Нуждин Г.А. Неоднородность распределения деформаций по толщине детали при совмещении операций обжига, обжига с утонением и выдавливания толстостенных трубных заготовок // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 1. С. 40-48.

Подписано в печать _____.2015.

Формат бумаги 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ _____.

Тулльский государственный университет.
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ.
300012, г. Тула, пр. Ленина, 97, а.