

На правах рукописи

НА ЛОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Матвеев Анатолий Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГИДРОШТАМПОВКИ
КРУТОИЗОГНУТЫХ И Т - ОБРАЗНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУБНЫХ
ЗАГОТОВОК**

Специальность: 05.03.05 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**



Москва 2004

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «НПО «Стартур»
(г.Рыбинск)

Научный консультант:

Профессор, д.т.н.

Е.А. Антонов

Официальные оппоненты:

Профессор, д.т.н.

А.В. Сафонов

Профессор, д.т.н.

С.С. Яковлев

Профессор, д.т.н.

А.Э. Артес

Ведущая организация:

ОАО ВНИТИ (ОАО « Научно – производственная
фирма по внедрению научных и инженерно –
технических инноваций» (г. С. – Петербург))

Защита состоится « 10 » 11 2004 г. в 14 часов на заседании
диссертационного совета Д212.141.04 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
1050005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

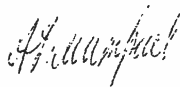
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим
высылать по указанному адресу.

Телефон для справок 267-09-63.

Автореферат разослан « 30 » 09 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



к.т.н., доц. Семенов В.И.

Подписано к печати 09.09.2004
Формат бум. 60х90/16
Усл. печ. л.2,0
Тираж 100

Сдано в производство 10.09.2004
Бумага множ.
Уч.-изд. л.2,1
Заказ № 128

Множительная лаборатория Рыбинской государственной авиационной технологической
академии им. П.А. Соловьёва (РГАТА), 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

104

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Актуальность проблемы. Совершенствование и дальнейшее развитие машиностроительного комплекса на базе научно-технического прогресса является актуальной народнохозяйственной задачей. Особое внимание при её решении должно быть уделено созданию и освоению технологических процессов, позволяющих существенно повысить как производительность труда, так и качество выпускаемой продукции. При этом важную роль играет дальнейшее развитие и совершенствование процессов обработки металлов давлением, связанное с разработкой и изучением новых областей и возможностей формоизменения металла пластическим деформированием.

Стремление исследователей к максимальному снижению расхода материалов, повышению производительности труда и качества изделий привело к появлению новых методов формообразования, к которым можно отнести процессы штамповки эластичными и жидкими средами. Значительный вклад в развитие этого направления внесли отечественные учёные: Б.Н. Береснев, К.Н. Богоявленский, Л.Ф. Верещагин, А.А. Галкин, Е.И. Исаченков, В.Л. Колмогоров, А.И. Колпашиников, А.А. Костава, А.Д. Комаров, В.П. Лукьянов, Е.С. Сизов и другие, а также ряд зарубежных учёных: Д.М. Александер, Н. Масанобу, Ф. Фукс, С. Фучизава, Т. Огура, Г. Уеда, Х. Такеяма и другие.

Технологические возможности пластического деформирования материалов с участием жидкой или эластичной среды значительно повышаются при использовании мерных трубных заготовок. Технологические процессы производства труб исключают образование в стенке трубы пор, рыхлот и иных дефектов изготавливаемых изделий. Кроме того, применение трубных заготовок, в подавляющих случаях, обеспечивает необходимые характеристики механических свойств, требования к макро- и микроструктуре, усталостной прочности, минимальной металлоёмкости и жёсткости кольцевых сечений. При этом возрастает не только коэффициент использования металла, но и удаётся повысить качество и точность изделий при высокой производительности их изготовления.

Дополнительно, использование в качестве деформирующего инструмента эластичных, жидких или газообразных сред позволяет обеспечить как универсальность инструмента, так и равномерность передачи деформирующей нагрузки на штампуемую заготовку. Это позволяет увеличить допустимую степень деформации материала, деформировать малопластичные металлы и сплавы в холодном состоянии, снизить трудоёмкость изготовления деталей при одновременном улучшении как их качества, так и условий производства.

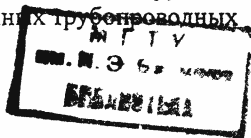
В промышленности внедрение процессов гидроштамповки труб особенно

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1698535

Матвеев А.С. Разработка ме



со ступенчатыми¹ (угольники, переходники и т.п.) и пересекающимися (тройники, крестовины и т.п.) осями, к которым предъявляются весьма высокие требования по надёжности и компактности. (При общей длине гидросистем самолёта в несколько километров с числом механических соединений и сварных швов в несколько тысяч, вопрос уменьшения зон сварки является актуальным. Сварной шов оказывает неоднородное термическое влияние на околошовную зону, вызывая концентрацию напряжений и снижая тем самым механическую и усталостную прочность трубопроводов).

Процессы гидроштамповки тройников и крестовин из трубных заготовок достаточно подробно исследованы и успешно применяются во многих отраслях промышленности. При этом теоретический анализ процесса выполнен путём совместного решения уравнений равновесия и пластичности (К.Н. Богдавленский). Полученные решения позволяют определить основные силовые параметры гидроштамповки тройника достаточные для реализации процесса. Однако комплексное влияние всех факторов на процесс гидроштамповки тройника изучены недостаточно, в частности недостаточно выявлено взаимное влияние силовых факторов как между собою, так и в зависимости от геометрических соотношений корпуса тройника и отвода.

Кроме изделий с пересекающимися осями, в трубопроводах широко применяют полые угольники и переходники, имеющие изогнутую или ступенчатую ось, для изготовления которых целесообразно использовать трубные заготовки.

Проблема изготовления полых криволинейных изделий имеющих радиус вогнутой поверхности колена равный или более половины диаметра прямолинейных участков изделия, успешно решена как в России, так и за рубежом путём применения в основном двух способов формоизменения трубной заготовки: а) проталкиванием заготовки с наполнителем через криволинейный канал матрицы; б) протяжкой заготовки на рогаобразном сердечнике (традиционно с дифференцированным нагревом заготовки).

Однако с развитием техники, особенно в аэрокосмической, авиационной, атомной и других отраслях промышленности, в которых применяемые детали и устройства работают в экстремальных условиях, к процессам изгиба, в частности, трубных заготовок, предъявляют всё возрастающие требования как с точки зрения обеспечения точности и экономичности исполнения, так и обеспечения компактности и надёжности работы деталей и устройств в эксплуатации. Основные проблемы, ограничивающие технологические возможности изгиба труб можно классифицировать следующим образом (Горбунов М.Н. и др.):

1.Образование овального сечения трубы в зоне изгиба.

¹ Изделия, имеющие «нулевой» или близкий к нулю радиус кривизны оси.

2. Образование волн и складок (гофр) на стенке с вогнутой стороны колена изгибаемой заготовки.
3. Локализация пластической деформации в стенке выпуклой стороны колена изгибаемой заготовки в виде местных утонений.
4. Пружинение детали после снятия деформирующей нагрузки.

Эти проблемы, возникающие при традиционной гибке заготовок изгибающим моментом, органически присущи этому процессу. Они определяются характером напряжённо-деформированного состояния, при котором в очаге пластической деформации заготовки преобладают деформации растяжения – сжатия с поворотом сечений вокруг центра кривизны.

Как известно технологические возможности процессов изгиба можно повысить путём нагружения очага деформации заготовок дополнительными нагрузками. При этом предельные степени деформации зависят от коэффициента жёсткости схемы напряжённого состояния (чем мягче схема, тем больше возможности процесса) и степени деформации материала в опасной зоне. Наиболее высокими технологическими возможностями обладают такие способы деформирования, при которых заготовка подвергается неравномерному всестороннему сжатию, а свободные (не контактирующие с инструментом) поверхности отсутствуют. При этом высокое гидростатическое давление в очаге деформации повышает пластичность материала, а всесторонний контакт с инструментом предотвращает потерю устойчивости и искажение сечений изделия.

Следует ожидать, что максимальный эффект можно получить выполнив отмеченные условия и исключив в очаге пластической деформации заготовки деформации растяжения – сжатия, обеспечив, например, преобладание деформации простого сдвига.

В связи с этим большой научный и практический интерес представляет разработка и исследование процессов сочетающих в себе вышеперечисленные условия деформирования заготовок с получением полуфабрикатов и изделий с крутоизогнутой^{*} или ступенчатой осью, позволяющие в той или иной степени решать проблемы, возникающие при традиционном изгибе заготовок моментом.

Данная работа посвящена разработке, теоретическому и экспериментальному исследованию процессов деформирования трубных^{**} и трубчатых^{***} заготовок в крутоизогнутые изделия, имеющих минимально возможные радиусы сопряжения прямолинейных участков,

* Изделия с относительным радиусомгиба ($R_{отн}$) менее 0,5 ($R_{отн} = R/H$, где R – радиус вогнутой поверхности колена изделия; H – геометрический параметр заготовки в плоскости деформирования. Для трубной заготовки $H = D_n$, где D_n – диаметр трубной заготовки).

** Проходное сечение – круг.

*** Проходное сечение отличается от круга.

а также теоретическому исследованию процессов гидроштамповки тройников, позволяющему установить взаимное влияние силовых факторов как между собою так и в зависимости от геометрических соотношений корпуса тройника и его отвода.

Актуальность разработки и исследования таких процессов, обеспечивающих высокоэкономичное изготовление качественных крутоизогнутых изделий и изделий с пересекающимися осями, в частности из трубных заготовок, диктуется актуальностью разработки и создания, например, высокоресурсного компактного трубопровода для нужд авиационной и аэрокосмической отраслей промышленности. Результаты решения отмеченной научно-технической проблемы применимы во многих отраслях народного хозяйства, способствуя ускорению научно-технического прогресса.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка основ теории процессов, технологии и оборудования для гидроштамповки полых деталей из трубных и трубчатых заготовок в изделия со ступенчатыми и пересекающимися осями.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Для изделий со ступенчатой осью:

1.1. Разработать процесс деформирования трубных заготовок на сверхмалый радиус, минимизировав или исключив в очаге пластической деформации заготовки, деформации растяжения – сжатия.

1.2. Разработать научные основы процесса, выполнить теоретические исследования, определить основные энергосиловые параметры его реализации.

1.3. Разработать экспериментальное оборудование, штамповую оснастку и выполнить экспериментальные исследования как процесса, так и качества изготавливаемых крутоизогнутых изделий, оценив при этом сходимость результатов теоретического анализа с экспериментом.

1.4. Разработать требования к материалам и заготовкам для изготовления крутоизогнутых изделий, выявить факторы, влияющие на потерю устойчивости деформируемых заготовок, разработать мероприятия по предупреждению брака штампуемых изделий.

1.5. На основе теоретических и экспериментальных исследований поставить на научную основу проектирование технологических процессов изготовления крутоизогнутых изделий, выработать технические требования и разработать промышленное оборудование для их реализации.

2. Для изделий с пересекающимися осями:

2.1. Выполнить теоретический анализ процессов гидроштамповки тройников энергетическим методом позволяющим определить взаимное влияние силовых факторов процесса гидроштамповки трубной заготовки как между собою, так и в зависимости от геометрических соотношений корпуса тройника и отвода.

2.2. Сравнить полученные теоретические решения по установлению силовых параметров гидроштамповки трубной заготовки с экспериментальными данными.

2.3. Выработать технические требования и разработать промышленное оборудование для реализации процессов.

Научная новизна: Разработаны теоретические основы деформирования трубных и трубчатых заготовок в изделия со ступенчатыми и пересекающимися осями при различных граничных условиях:

- установлены общие, для различных вариантов наложения деформирующих нагрузок на заготовку, взаимосвязи силовых параметров процессов с механическими свойствами материала заготовок (с учетом упрочнения), геометрическими характеристиками заготовок и изделий, ориентации заготовок относительно плоскости деформирования (для крутоизогнутых изделий изготавливаемых из трубчатых заготовок), коэффициента переходности изделий, условиями контактного трения;
- установлены области применения математических моделей по определению силовых параметров процессов, экспериментально доказана их работоспособность;
- предложена научная классификация процессов, основанная на объективных критериях их общности.

Новые технические решения защищены 10-ю свидетельствами на изобретения.

Методика исследований и достоверность результатов. Теоретические исследования выполнены с использованием энергетического метода (метод баланса мощностей). Некоторые задачи решены путем совместного решения уравнений равновесия и уравнения пластичности. Экспериментальные исследования проводили на основе теории инженерного эксперимента с проверкой адекватности теоретических зависимостей реальным процессам деформирования. Результаты экспериментов обрабатывались методом наименьших квадратов. При этом относительная погрешность результатов расчета и эксперимента, по определению силовых параметров процессов, находилась в диапазоне 12...20%. Для доказательства правомерности использования при математическом описании процессов гидроштамповки изделий модели

жесткопластичного материала, использован метод течения И.П. Ренне, позволивший определить интенсивность сдвиговой и линейной деформаций с последующей оценкой напряжения течения σ , материала заготовки по кривым упрочнения. Металлографические исследования изготовленных крутоизогнутых изделий, характер искажения координатной сетки и распределение приращений интенсивности деформаций позволили сделать вывод об удовлетворительной сходимости характеристик очага деформации, принятых при теоретическом анализе, с экспериментом.

Достоверность теоретических данных подтверждена практическим использованием результатов при подготовке и проведении экспериментальных исследований процессов изготовления изделий со ступенчатыми и пересекающимися осями.

Практическая ценность работы. На основе результатов исследований разработана методика расчета силовых параметров деформирования трубных и трубчатых заготовок в изделия со ступенчатыми и пересекающимися осями, позволяющая:

- выбрать тот или иной вариант процесса формоизменения заготовки в зависимости от требуемых геометрических параметров изготавливаемого изделия и механических свойств материала заготовки;
- целенаправленно комбинировать внешние нагрузки для получения требуемых прочностных и геометрических характеристик изделия;
- минимизировать потребные внешние нагрузки, накладываемые на заготовку при гидроштамповке разнопроходных ступенчатых изделий и изделий с пересекающимися осями из трубных и трубчатых заготовок;
- установить возможность изготовления пустотелых многоступенчатых изделий относящихся к классу эксцентриковый вал, коленвал, распредвал и т.п.;
- сформулировать технические требования к штамповой оснастке и оборудованию.

Разработаны рекомендации по предотвращению брака штампуемых изделий, доказана возможность деформирования разработанным способом не только цельнотянутых, но и сварных трубных заготовок.

Разработан пресс-полуавтомат для гидроштамповки трубных и трубчатых заготовок обладающий достаточно широкими технологическими возможностями, разработана гамма устройств и приемов, направленных на повышение надежности работы узлов прессы.

Основные положения работы используются в учебном процессе Рыбинской государственной авиационной технологической академии им П.А. Соловьёва.

Законченность работы определяется завершенными теоретическими разработками и реализацией полученных результатов на практике.

Результаты работы апробированы в лабораторных условиях и подготовлены к внедрению в Открытом акционерном обществе «НПО «САТУРН» (г. Рыбинск) при разработках конструкций и технологии -

ческих процессов изготовления фитингов высокоресурсных компактных трубопроводов газотурбинных авиационных двигателей.

При этом внедрение технологических процессов гидроштамповки трубных и трубчатых заготовок в изделия со ступенчатыми и пересекающимися осями позволяет:

- повысить надежность трубопровода путем сокращения количества сварных швов;
- снизить трудоемкость изготовления изделий в 4...6 раз;
- повысить коэффициент использования металла до 0,8...0,95;
- сократить количество персонала традиционно занятого изготовлением изделий авиационного трубопровода, устранить ручной труд, высвободить производственные площади, повысить культуру производства и дизайн изделий.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных работников Рыбинской государственной авиационной технологической академии им П.А. Соловьёва с 1983 по 2003 гг. По материалам работы сделаны доклады: на областном научно-техническом семинаре "Прогрессивные технологические процессы обработки металлов давлением", Ярославль, 1988 г.; зональной научно-технической конференции "Опыт освоения новой техники, оснастки, материалов в кузнечно-штамповочном производстве", Пенза, 1988 г., научно-технической конференции "Прогрессивные технологии кузнечно-штамповочного производства", Челябинск, 1988 г.; семинаре "Листовая и горячая объемная штамповка", Москва, 1991 г.; выездном заседании головного совета "Машиностроение", Рыбинск, 1994 г.; Всероссийской научно-технической конференции "Повышение эффективности механообработки на основе аналитического и экспериментального моделирования процессов", Рыбинск, 1999 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмические технологии и образование на рубеже веков», Рыбинск, 2002 г.; Российской научно-технической конференции «Новые материалы, прогрессивные технологические процессы и управление качеством в заготовительном производстве», Рыбинск, 2002 г., кафедре МТ – 6 Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, 2003г.

Публикации. Материалы диссертации частично изложены в 31 печатной работе и защищены, в том числе, 10-ю свидетельствами РФ на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Содержит 190 рисунков, 6 таблиц, список литературы из 146 наименований. Общий объем работы составляет 337 страниц машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, отмечена необходимость поиска новых технологических процессов и разработки научных основ деформирования трубных и трубчатых заготовок в крутоизогнутые изделия с минимальными (приближающимися к нулю) радиусами сопряжения прямолинейных участков, а также изделий с пересекающимися осями, сформулированы цели работы, изложены научная новизна, практическая значимость и основные научные результаты выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор научно-технической и патентной литературы по технологии и теории изготовления изделий с изогнутой и ступенчатой осью из трубных заготовок. Отмечены основные практические проблемы возникающие при изгибе трубных заготовок, из которых выделена проблема изготовления изделий с минимально возможными радиусами сопряжения прямолинейных участков, решению которой посвящена данная работа. Выполнен обзор способов интенсификации операции изгиба трубных заготовок, показавший, что *максимальный эффект при формоизменении заготовки можно получить обеспечив в очаге деформации схему неравномерного всестороннего сжатия при отсутствии свободных (не контактирующих с инструментом) поверхностей.*

Выполнен анализ факторов ограничивающих технологические возможности процессов изгиба трубных заготовок на сверхмалый радиус. При этом отмечено, что несмотря на значительные потребности различных отраслей промышленности в равно-¹ и разнопроходных полых крутоизогнутых изделиях (угольники, переходники и т.п.), технический уровень их производства не отвечает современным требованиям, отличаясь низкой производительностью, значительной металлоёмкостью и, в отдельных случаях, пониженной надёжностью изделий в эксплуатации. Рассмотрены методы изготовления Г-образных изделий из горячештампованных, литых, листовых и трубных (используя сварку) заготовок, применяемые в машиностроении. Показана целесообразность использования при производстве крутоизогнутых изделий трубных заготовок. Однако традиционные способы изгиба труб не позволяют деформировать трубную заготовку в крутоизогнутое изделие, имеющее $R_{отн} < 0,5...0,4$ вследствие возникновения различных форм потери устойчивости как непосредственно заготовки (образование овального сечения трубы в зоне изгиба, образование гофр (складок) в зоне вогнутой поверхности колена изделия), так и её стенки (чрезмерное утонение стенки в зоне выпуклой поверхности гиба). Выполнен анализ причин приводящих к различным формам потери устойчивости заготовки при её изгибе по радиусу. Определены факторы, способствующие

¹ Изделия, имеющие соответственно равные и не равные площади проходных сечений прямолинейных участков.

предотвращению этих нежелательных явлений.

На основе качественных различий в схемах напряжённо-деформированного состояния материала в очаге деформации, а именно преобладания деформации растяжения-сжатия с поворотом кольцевых сечений относительно центра кривизны или преобладания деформации сдвига, предложено изделия, имеющие $R_{отн} \geq 0,5$ относить к изделиям с малым радиусомгиба, а изделия с $R_{отн} < 0,5$ – относить к крутоизогнутым.

Оценены технологические возможности, особенности и недостатки некоторых известных процессов деформирования трубных заготовок в изделия с $R_{отн} > 0,5$. При этом наиболее близким к решению задачи по деформированию трубных заготовок в крутоизогнутые изделия является способ формообразования патрубков, заключающийся в проталкивании трубной заготовки, заполненной наполнителем, через криволинейный канал матрицы. Теоретические и экспериментальные исследования способа выполнены А.Г. Ершовым.

Особое внимание уделено поисковым работам по изготовлению крутоизогнутых изделий, имеющих $R_{отн} < 0,5$, из трубных заготовок. Интересны работы в этом направлении голландской фирмы Center for Metalworking, разрабатывающей способ штамповки трубных заготовок в крутоизогнутые $\perp$ -образные изделия путём сдвига. Некоторые теоретические и экспериментальные исследования способа выполнили Powell G. и Awitzur B., определившие энергетическим методом суммарные относительные давления, накладываемые на заготовку, обеспечивающие реализацию способа. Однако полученное решение охватывает лишь процесс штамповки ступенчатых равнопроходных изделий, не учитывает влияние радиусов кривизны выпуклых и вогнутых поверхностей изделия на силовые параметры процесса и имеет, вследствие этого, ограниченное применение. Кроме того, известное решение не позволяет выявить влияние компонентов общей силы на процесс формоизменения заготовки, что препятствует целенаправленному управлению как непосредственно процессом, так и геометрией штампуемых изделий.

В России работы по деформированию трубных заготовок в крутоизогнутые изделия проводились в С.-Петербургском техническом университете, сотрудниками которого разработано несколько модификаций способа и устройств для штамповки трубных заготовок в крутоизогнутые изделия. Выполнены некоторые экспериментальные исследования процесса. Полученные результаты представляют значительную ценность, однако отсутствие достаточно разработанной теоретической базы процесса, а также отсутствие его глубоких экспериментальных исследований сдерживают внедрение способа в промышленность.

Анализ состояния технологии и теории изготовления крутоизогнутых изделий из трубных заготовок позволил сформулировать задачи исследований, решаемые в рамках данной работы.

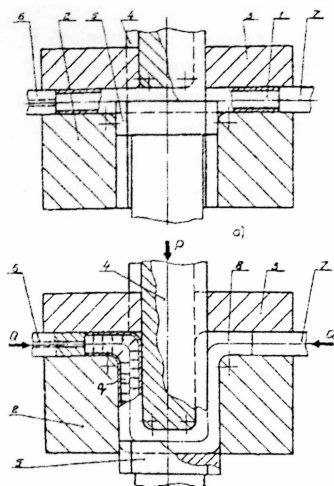


Рис. 1. Схема деформирования трубной заготовки в крутоизогнутый Γ -образный полуфабрикат:
а) исходное положение;
б) процесс деформирования заготовки

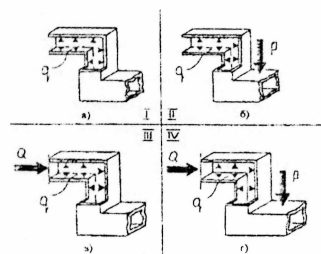


Рис. 2. Варианты наложения внешних нагрузок на заготовку

Во второй главе изложены теоретические исследования процессов формообразования крутоизогнутых изделий из трубных и трубчатых заготовок квадратного и прямоугольного сечений. Объединяющими факторами при этом являются единая принципиальная схема процессов и единый теоретический аппарат их исследования. Назовём разработанные процессы как Γ -процессы.

Сущность Γ -процесса заключается в следующем.

Трубную заготовку 1 (рис.1) устанавливают в ручей штампа, состоящего из неподвижных нижней 2 и верхней 3 полуматриц, имеющих плоскость разреза, проходящую через ось заготовки перпендикулярно плоскости чертежа. В центральное отверстие полуматрицы 3 вводят верхнюю подвижную полуматрицу 4 до соприкосновения с заготовкой 1. Снизу с заготовкой 1 контактирует нижняя подвижная полуматрица 5. В сомкнутом положении силой F полуматрицы 4 и 5 образуют подвижную матрицу, а ее канал охватывает заготовку 1. На боковых гранях полуматрицы 4 и контактирующей с ней полуматрицы 2, выполнены каналы, например, полуцилиндрической (для круглых в сечении заготовок) формы. Установив заготовку в ручье штампа, ее полость заполняют пластичным или жидкостным наполнителем, например, машинным маслом. Затем сообщают встречное синхронное перемещение осевым пуансонам 6 и 7, обеспечивая их силовой

контакт с торцами заготовки, осуществляя при этом герметизацию ее полости. Через осевой канал, выполненный в пуансоне 6, в полость заготовки 1 добавляют наполнитель, создавая определенное гидростатическое давление q . Продолжая перемещать пуансоны 6 и 7 навстречу друг другу сообщают перемещение подвижной матрицы, выдерживая заданное соотношение скоростей между ними. Под действием осевых сил Q прикладываемых к заготовке пуансонами 6 и 7, высокого гидростатического давления наполнителя q в полости заготовки и нагрузки P со стороны подвижной 4 осу -

шествуют деформирование трубчатой заготовки в Γ -образный крутоизогнутый полуфабрикат, который служит основой для изготовления, например, Γ , Γ , Γ -образных изделий.

Деформирование заготовки может быть осуществлено по четырем вариантам наложения внешних нагрузок показанных на рис.2. Каждый из вариантов является самостоятельным процессом с определенными технологическими возможностями.

Для определения силовых параметров и исследования особенностей процессов разработана идеализированная схема штамповки крутоизогнутых изделий основанная на анализе характера искажения деформированной координатной сетки, нанесенной на поверхность трубной заготовки (рис. 3).

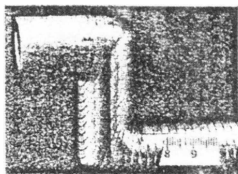


Рис.3. Характер искажения деформированной координатной сетки, нанесенной на наружную поверхность трубной заготовки

Из рис.3 видно, что формоизменение заготовки по Γ -процессу осуществляется путем локали Γ ии деформации сдвига в узкой зоне колена изделия.

При этом разработана идеализированная модель деформирования материала (рис.4), по которой элементарный объем, имеющий в плоскости деформирования заготовки прямоугольное сечение (рис.4а) перемещается между линиями тока 1 и 2 под действием внешней нагрузки P_z , не изменяя свою форму до пересечения с плоскостью Γ - Γ .

В плоскости Γ - Γ находится очаг пластической деформации, в котором элементарный объем изменяет свою форму на ромбовидную, деформируясь по схеме простого сдвига (рис.4б). Пересекая плоскость Γ - Γ , элементарные объемы резко меняют направление течения, смещаясь в упругую (послеочаговую) зону, сохраняя ромбовидную форму (рис.4в).

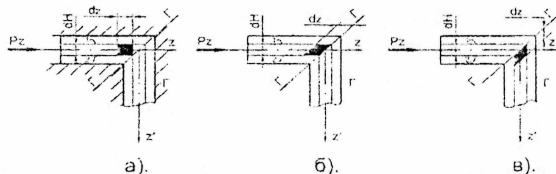


Рис.4. Идеализированная модель деформирования заготовки

По расчетной схеме идеализированного процесса (рис.5), очаг пластической деформации трубной заготовки вырождается в эллипсное кольцо лежащее в плоскости Γ - Γ , являющейся поверхностью разрыва скоростей. При этом формоизменение заготовки осуществляется путем локализации деформации сдвига в указанной плоскости.

Энергетическим методом получены общие выражения параметров

внешних нагрузок, накладываемых на заготовку пуансонами и подвижной матрицей необходимые для её деформирования в крутоизогнутое изделие, например при $\alpha=\pi/4$, в виде:

Для трубной заготовки

$$\frac{P_z}{\sigma_s} + \frac{P'_z}{\sigma_s} = \frac{R_H}{R_H^2 - R_B^2} \left[\frac{m}{\sqrt{3}} \left(2L_i - \frac{R_H}{2} + E_i \right) - \frac{q}{\sigma_s} R_H \right] + \frac{2}{\sqrt{3}}; \quad (1)$$

Для трубчатой заготовки прямоугольного сечения

$$\frac{P_z}{\sigma_s} + \frac{P'_z}{\sigma_s} = \frac{m\sqrt{2}}{2\sqrt{3}} \left[\frac{2L_i(A+B) + B(A+E_i)}{2S(B-2S+A)} \right] + \frac{2}{\sqrt{6}} - \frac{q}{\sigma_s} \frac{AB\sqrt{2}}{4S(B-2S+A)}; \quad (2)$$

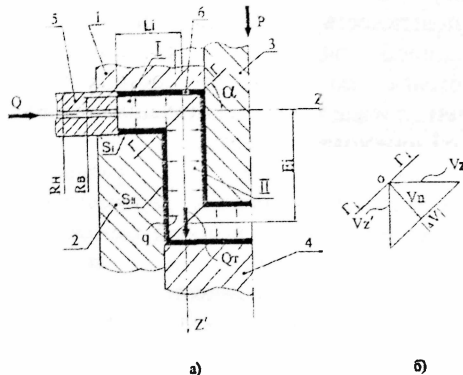


Рис. 5. Расчетная схема (а) и голограф скоростей (б) идеализированного процесса

где: P_z/σ_s , P'_z/σ_s – относительные давления развиваемые соответственно осевыми пуансонами и подвижной матрицей по отношению к одному из очагов деформации; σ_s – напряжение текучести материала заготовки; m – коэффициент трения ($m=\tau_K/\sigma_K$, где: τ_K – касательные напряжения трения; σ_K – контактные напряжения); A , B – соответственно высота и ширина трубчатой заготовки прямоугольного сечения.

Анализ выражений (1) и (2), показывает, что давление наполнителя разгружает осевые пуансоны и подвижную матрицу, а наложение внешней нагрузки на подвижную матрицу приводит к разгрузке пуансонов и наоборот.

При $P_z/\sigma_s = P'_z/\sigma_s = 0$ – реализуется I вариант способа; при $P_z/\sigma_s = 0$ – II вариант; при $P'_z/\sigma_s = 0$ – III вариант; $P_z/\sigma_s = P'_z/\sigma_s > 0$ – IV вариант и при $P_z/\sigma_s < 0$ – реализуется процесс штамповки заготовки с противодавлением. При этом IV вариант способа имеет наиболее широкие технологические возможности.

Дополнительно рассмотрены процессы формоизменения трубных и трубчатых заготовок в разнопроходные крутоизогнутые изделия. При этом в качестве геометрической характеристики разнопроходных изделий введен коэффициент переходности K , учитывающий равенство смещаемых объемов материала, перемещаемого из предпочаговой зоны заготовки в послеочаговую (рис.6).

Энергетическим методом получены общие выражения потребных относительных давлений, развиваемых осевым пуансоном и подвижной матрицей при гидроштамповке крутоизогнутых изделий в виде:

а) для трубных заготовок (рис.6а)

$$\frac{P_z}{\sigma_z} + \frac{P'_z}{\sigma_z} = \frac{R_{H.H.}}{R_{H.H.}^2 - R_{B.H.}^2} \left(\frac{m}{\sqrt{3}} E_i - \frac{q}{\sigma_s} R_{H.H.} \right) + \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{R_{H.3} (2L_i - KR_{H.3})}{R_{H.3.}^2 - R_{B.3.}^2} + \frac{1}{K\sqrt{3} \cos^2(\arctg K)}; \quad (3)$$

б) для трубчатых заготовок прямоугольного сечения (рис.6б)

$$\frac{P_z}{\sigma_z} + \frac{P'_z}{\sigma_z} = \frac{2}{\sqrt{3}} + \frac{m}{\sqrt{3}} [2L_i (A_3 + B_3) + A_{H.} (A_3 + 1) + B_3 E_i] \cdot \frac{K}{A_{H.} + B_{H.} - 2S} - \frac{q}{\sigma_s} A_3 B_3 \frac{1}{K}. \quad (4)$$

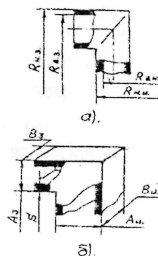


Рис. 6

Выражение (3) является общим для всей совокупности штампуемых равно- и разнопроходных крутоизогнутых изделий, имеющих кольцевые поперечные сечения прямолинейных участков в виде окружностей, а выражение (4) — общим для совокупности изделий имеющих прямоугольные (в т.ч. квадратные) кольцевые сечения прямолинейных участков. При $K=1$, выражения (3), (4) преобразуются соответственно в формулы (1) и (2), при $K<1$ — позволяют определить необходимые внешние нагрузки

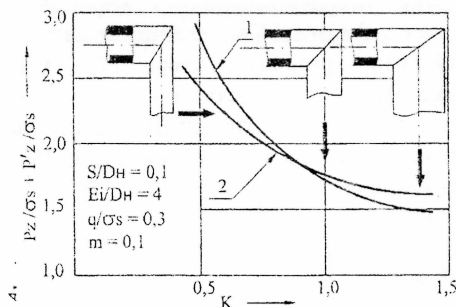


Рис. 7. Влияние коэффициента переходности крутоизогнутых изделий (K) на суммарные относительные давления гидроштамповки, развиваемые осевым пуансоном и подвижной матрицей (IV вариант способа):

1 — при $L_i = \text{const}$; $E'_i = \text{var}$;
2 — при $L_i = E'_i = \text{const}$

для гидроштамповки изделий имеющих переход (из предочаговой зоны в послеочаговую) с большого проходного сечения на меньший, и при $K > 1$ — изделий, имеющих переход с меньшего проходного сечения на больший. При фиксированном значении K — определяют внешние нагрузки для каждого из четырех вариантов реализации Γ - процесса. На рис. 7 показано влияние коэффициента переходности изделия на силовые параметры процессов. Анализ выражения (3) позволяет минимизировать энергосиловые затраты на

изготовление разнопроходных крутоизогнутых изделий. В частности выявил целесообразность применения трубной заготовки с наружным диаметром равным наименьшему диаметру колена изготавливаемого изделия и тем самым реализовать процесс гидро -

штамповки изделия при $K > 1$, требующего минимальных энергетических затрат на его штамповку (А.с.№1771844).

Ввиду того, что выражения (1), (2), (3), (4) не учитывают влияние на силовые параметры Γ -процесса таких характеристик очага

деформации, как величину радиусов кривизны вогнутых и выпуклых поверхностей колен штампуемых изделий, для дальнейшего изучения процессов разработана блочная модель деформирования трубной заготовки в крутоизогнутое изделие (рис.8). При этом деформируемая заготовка представлена состоящей из нескольких, например четырех, жестких блоков, являющимися цилиндрами со скошенными основаниями. В каждом из блоков распределение скоростей

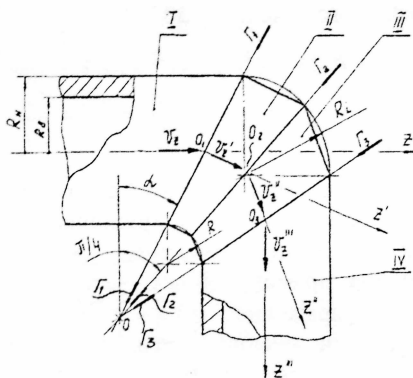


Рис. 8. Блочная модель деформирования трубной заготовки в крутоизогнутое изделие

течения материала постоянно, а неравномерность деформации определяется локализацией сдвиговых деформаций на границах стыковых блоков, являющихся поверхностями разрыва скоростей. Очаг пластической деформации заключен между плоскостями $\Gamma_1-\Gamma_1$ и $\Gamma_3-\Gamma_3$ проходящими через точки сопряжения радиусов вогнутой (R) и выпуклой (R_i) поверхностей с прямолинейными поверхностями блоков I и IV и характеризуется углом α определяемого как

а) для трубной заготовки

$$\alpha = \arctg \left(1 + R_{отн} - \frac{R_i}{D_H} \right); \quad (5)$$

б) для трубчатой заготовки, например прямоугольного сечения

$$\alpha = \arctg \left(1 + \frac{R}{A} - \frac{R_i}{A} \right). \quad (6)$$

При этом, как и в предыдущем случае, принято, что материал заготовки жёсткопластичен, а силы контактного трения не зависят от нормального давления.

Исходя из равенства мощностей внешних и внутренних сил на кинематически возможных скоростях получены общие выражения потребных внешних нагрузок для каждого из вариантов процесса гидроштамповки трубных и трубчатых заготовок. Например, при гидроштамповке равнопроходных крутоизогнутых изделий из трубных заготовок в виде:

$$\frac{P_z}{\sigma_s} + \frac{P_z}{\sigma_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ \left(\operatorname{tg} \alpha - \frac{\sin(\alpha - 22.5)}{\sin(\alpha + 67.5)} + \frac{0.765 \cos \alpha}{(R_H + R_B) \sin(\alpha + 67.5)} \right) \times \left[R \left(1 + \frac{\sin \alpha}{\sin(45 - \alpha)} \right) + 2R_B \right] \right\} +$$

$$\frac{m}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R_H}{R_H^2 - R_B^2} \left\{ 2(L_K + R_H \operatorname{tg} \alpha) + \operatorname{cosec}(\alpha + 67.5) \left[1.915R + R_H \frac{\operatorname{tg}(45 - \alpha)}{\cos \alpha} + 0.383R \right] + E - 2[R_H(1 - \operatorname{tg} \alpha) + R] \right\} -$$

$$- \frac{q}{\sigma_s} \frac{R_H^2}{R_H^2 - R_B^2}; \quad (7)$$

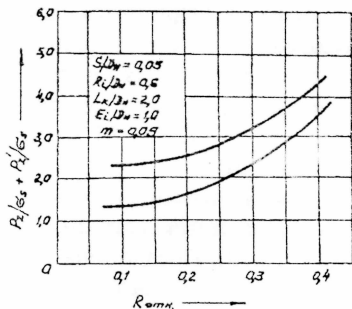


Рис. 9. Зависимость относительных суммарных давлений формообразования ($P_z/\sigma_s + P_z/\sigma_s$), развиваемых осевым пуансоном и подвижной матрицей от относительного радиуса колена ($R_{отн}$) при формообразовании изделия по IV варианту способа: 1 – при $q/\sigma_s = 0,4$; 2 – при $q/\sigma_s = 0,5$

На рис.9 приведены зависимости, построенные по выражению (7). Из рис.9 видно, что с уменьшением $R_{отн}$ изделия необходимые для штамповки заготовки суммарные давления уменьшаются, а увеличение давления наполнителя приводит к снижению потребных нагрузок на осевых пуансонах и подвижной матрице.

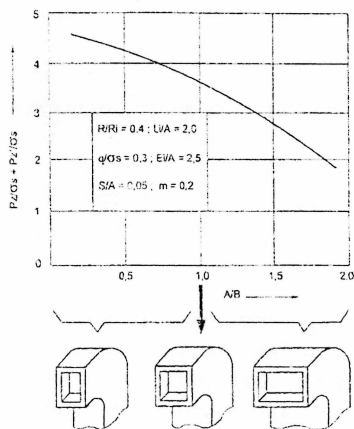


Рис. 10. Зависимость потребных относительных давлений формообразования от геометрических характеристик (A/B) трубчатых заготовок и их ориентации относительно плоскости деформирования

Показано, что на величину потребных относительных давлений штамповки трубчатых заготовок прямоугольного сечения (рис10) существенно влияют не только геометрические характеристики заготовки (A/B), но и ориентация заготовки относительно плоскости деформирования.

Совместным решением уравнений равновесия и пластичности получены зависимости потребных сил смыкания подвижных и неподвижных полуматриц, разработана классификация процессов, в основе которой заложены объективные критерии их общности: варианты наложения внешних нагрузок и характер напряжений, действующих по границе очага деформации с деформированной частью заготовки. Показаны перспективные направления в развитии процессов. В частности технологические

возможности $\square$ -процесса могут быть расширены путём совмещения про -

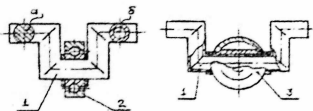


Рис. 11. Примеры изделий, изготовление которых возможно совмещением U-процесса со сборочными операциями

решения вопроса по установлению максимально возможной длины предпочаговой зоны заготовки, способной без значительных потерь передать деформирующую силу Q в очаг деформации, предложен вариант

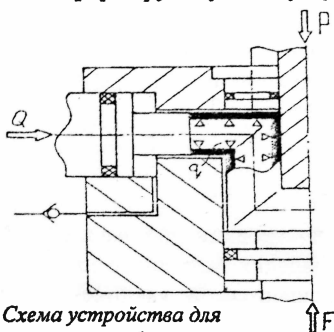


Рис. 12. Схема устройства для деформирования трубной заготовки в режиме жидкостного трения между поверхностями заготовки и матрицы

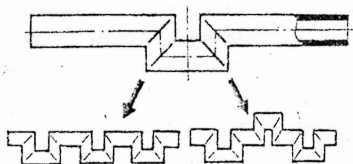


Рис. 13. Варианты многоступенчатых крутоизогнутых изделий

процесса деформирования заготовки в крутоизогнутое изделие со сборочными операциями (рис.11), а также рассматривается вопрос изготовления многоступенчатых коленчатых валов, распределительных валов и т.п. из трубных заготовок. При этом для

устройства (А. с. 916010), реализующий U-процесс с обеспечением жидкостного трения между поверхностями матрицы и заготовки (рис.12). Предложена технологическая последовательность и схемы устройств для изготовления, например, многоступенчатых колен валов показанных на рис.13. Дополнительно выполнен анализ процессов гидроштамповки трубных заготовок в изделия с пересекающимися осями (тройники, крестовины и т.п.) энергетическим методом, позволяющим выявить взаимное влияние силовых параметров процесса как между собою так и в зависимости от геометрических соотношений корпуса тройника и отвода.

На рис.14 приведена классическая схема гидроштамповки тройника по которой формоизменение трубной заготовки в тройник реализуется за счет наложения осевых сил Q , давления наполнителя q и силы противодействия P .

Рамки анализа ограничим прямоугольными тройниками имеющими взаимно перпендикулярные оси корпуса и отвода, а сам тройник будем рассматривать как два полых круговых цилиндра пересекающихся под прямым углом (рис.15), при этом $\varphi = \arcsin \frac{d_H}{D_H}$ а $\beta = \arctg \left(\frac{d_H}{D_H} - \text{ctg} \varphi \right)$.

Дополнительно, для геометрической идентификации тройников, введём коэффициент переходности — K , равный отношению смещённых объёмов материала отвода и корпуса тройника в процессе его гидроштамповки.

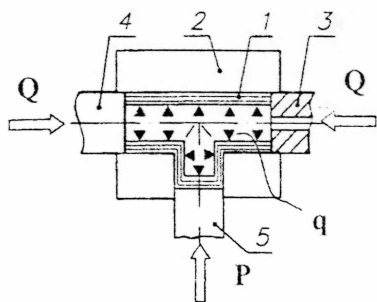


Рис. 14. Схема процесса гидроштамповки тройника из трубной заготовки: 1 – тройник; 2 – разъемная матрица; 3, 4 – осевые пуансоны; 5 – пуансон противодавления

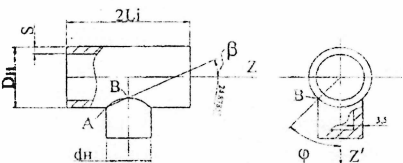


Рис. 15. Геометрические характеристики тройника

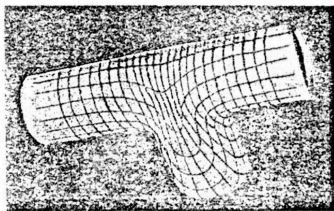


Рис. 16. Характер искажения деформированной координатной сетки на поверхности тройника

деформации представляет из себя часть эллипсного кольца лежащего в плоскости Г-Г под углом β к оси Z. Плоскость Г-Г является поверхностью разрыва скоростей, отражающей в расчетной схеме деформируемой заготовки область локализации деформации сдвига. Исходя из равенства мощностей внешних и внутренних сил на кинематически возможных скоростях получено выражение для определения потребных относительных давлений развиваемых осевым пуансоном в виде

При этом
$$K = \frac{d_H - S}{D_H - S}$$

Таким образом коэффициент $K=1$ характеризует равнопроходные тройники, имеющие равные диаметры корпуса и отвода, $K < 1$ – разнопроходные тройники с отрицательной переходностью, имеющие диаметр отвода меньше диаметра корпуса и $K > 1$ – тройники с положительной переходностью, то есть имеющие диаметр отвода больше диаметра корпуса.

Анализ процесса ограничим первыми двумя разновидностями тройников как наиболее распространенными в промышленности.

Характер искажения деформированной координатной сетки на поверхности отштампованного тройника (рис. 16) и распределение интенсивности деформаций позволяют высказать предположение о сдвиговом характере деформации и ее локализации в узкой зоне перехода корпуса тройника в отвод.

четная схема (рис. 17а) и голограф скоростей (рис. 17б) идеализированного процесса гидроштамповки тройников при следующих допущениях: а) деформируемый материал жесткопластичен; б) в материале допустимы разрывы скоростей в сверхтонких слоях – поверхностях разрыва при сохранении непрерывности нормальных составляющих скоростей; в) силы контактного трения не зависят от нормальных давлений, г) толщины стенок корпуса тройника и отвода равны между собою.

В расчетной схеме очаг пластической деформации представляет из себя часть эллипсного кольца лежащего в плоскости Г-Г под углом β к оси Z. Плоскость Г-Г является поверхностью разрыва скоростей, отражающей в расчетной схеме деформируемой заготовки область локализации деформации сдвига. Исходя из равенства мощностей внешних и внутренних сил на кинематически возможных скоростях получено выражение для определения потребных относительных давлений развиваемых осевым пуансоном в виде

$$\frac{P_z}{\sigma_s} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{K}{2 \cos^2 \beta} + F' \frac{m}{\pi S (D_n - S)} \right] + \frac{P_z'}{\sigma_s} - \frac{q}{\sigma_s} \frac{(d_n - 2S)^2}{4K(D_n - S)} \quad (8)$$

где:

$$F' = \left\{ \pi D_n L_i - \left[\frac{d_n}{2} - \frac{\pi \sqrt{(D_n^2 - d_n^2)} \cdot \phi}{360^\circ} \right] \frac{D_n \cdot d_n}{D_n - \sqrt{(D_n^2 - d_n^2)}} + \left[\pi E_i - D_n - 0,57 \sqrt{(D_n^2 - d_n^2)} \right] \right\}$$

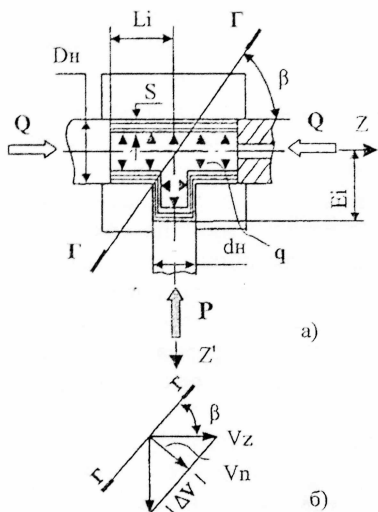


Рис.17. Расчётная схема (а) и годограф скоростей (б) идеализированного процесса гидроштамповки тройника

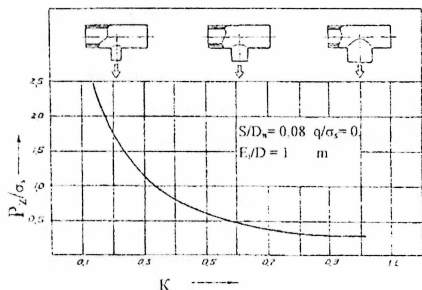


Рис.18. Изменение удельных нагрузок (P_z/σ_s), развиваемых осевым пуансоном при гидроштамповке тройника в зависимости от его коэффициента переходности (K)

Анализ выражения (8) показывает, что увеличение силы противодействия влечёт за собой увеличение потребной для гидроштамповки силы накладываемой осевым пуансоном, а увеличение давления наполнителя в полости заготовки наоборот приводит к разгрузке осевых пуансонов.

Выражение (8) является общим для процессов гидроштамповки прямоугольных тройников из трубных заготовок имеющих различный коэффициент переходности K . При $K=1$ и $P_z/\sigma_s=0$ выражение (8) позволяет определить потребные относительные нагрузки на осевом пуансоне при гидроштамповке равнопроходного тройника без наложения противодействия, при $P_z/\sigma_s \neq 0$ - описывает процесс штамповки равнопроходного тройника с противодействием. При $K < 1$ - гидроштамповку тройников с отрицательной переходностью и при $K > 1$ - с положительной переходностью.

Выражение (8) позволяет установить влияние коэффициента переходности K на силовые параметры процесса (рис.18). Рис.18 показывает, что с увеличением коэффициента переходности потребные удельные нагрузки, развиваемые осевым пуансоном, интенсивно снижаются.

Из рис.18 следует, что при реализации процесса гидро-штамповки тройников энергетически выгодно осуществлять гидроштамповку при более высоких коэффициентах переходности K изделий с последующей

периформовкой отводов на меньший диаметр (при необходимости)

например, процессами обжима отвода или редуцирования и т.п. В этом случае при гидроштамповке тройника снижаются удельные нагрузки на осевые пуансоны и, следовательно, повышается их стойкость.

Выполненный анализ процесса гидроштамповки тройников энергетическим методом позволяет не только определить силовые параметры процесса, но и дает возможность определить взаимное влияние силовых факторов на управление процессом при его реализации.

Выражения (1), (2), (3), (4), (7), (8) не учитывают упрочнение материала в процессе деформирования. Для его учета принято, что поведение материала описывается условием пластичности со степенным законом деформационного упрочнения (Л.Г. Степанский) в виде $\sigma_s = B \cdot \epsilon^n$, где B , n – постоянные материала (Кроха В.А.), а ϵ_i (интенсивность конечных деформаций) – можно определить (при стационарной плоскости разрыва скоростей) в виде $\epsilon_i = \frac{|\Delta V|}{\sqrt{3|V_n|}}$, где ΔV – разрыв касательной составляющей скорости; V_n – нормальная к поверхности разрыва составляющая скорости.

В третьей главе изложены результаты экспериментальных исследований процессов гидроштамповки крутоизогнутых изделий из трубных и трубчатых заготовок. Деформированию подвергались трубные заготовки из стали 12Х18Н10Т, стали 20, стали 3сп, меди М1, сплава АД1, имеющие $D_n = 18, 20$ мм, относительную толщину стенок $S/D_n = 0,05 \dots 0,25$ и длину 215 мм, а также трубчатые заготовки $20 \times 20 \times 1,5$ мм из стали 3сп, прутковые заготовки из стали 20, меди М1 и листовые заготовки собранные в пакеты из материалов: сталь 12Х18Н10Т, сплав АД1М.

Деформирование осуществлялось в специальных штампах (рис.1) с использованием модернизированной установки для гидроштамповки трубных заготовок (А.с. 599885). В качестве наполнителя использовалось машинное масло.

Одной из основных задач экспериментальных исследований являлось определение степени соответствия предложенных математических моделей, по определению силовых параметров процессов, экспериментальным данным, а также выявление областей применения идеализированной схемы и блочной модели деформирования заготовки при расчёте внешних нагрузок. При этом были практически реализованы четыре варианта – процесса при гидроштамповке трубных и трубчатых заготовок с получением крутоизогнутых равно- и разнопроходных – образных изделий, имеющих смещение E_i (рис. 5) до 50 мм и $R_{отн} = (0,05 \dots 0,6)$, процессы гидроштамповки равно- и разнопроходных тройников из стали 20, стали 12Х18Н10Т, латуни ЛС-59 и др., а также реализовывались процессы деформирования тонколистовых заготовок «на ребро».

В ходе экспериментов, с использованием образцовых манометров и последующим пересчётом, определялись силы развиваемые пуансонами и

подвижной матрицей, которые сравнивались с аналитическими. Эксперименты повторялись от 4-х до 6 раз, результаты экспериментов обрабатывались методами математической статистики.

При этом установлено, что идеализированная схема расчёта приема для определения силовых параметров Γ -процессов при изготовления изделий с малыми радиусами вогнутой (R) и выпуклой (R_i) поверхностями колен изделий не превышающих $0,1 D_n$, а при R и $R_i > 0,1 D_n$ лучшую сходимость с экспериментом показывает блочная модель Γ -процессов, по которой относительная погрешность аналитических и экспериментальных данных не превышала 15...20 процентов.

В экспериментах по определению силовых параметров процессов подтвердились установленные теоретически: 1) взаимосвязь между накладываемыми на заготовку внешними нагрузками при гидроштамповке трубных и трубчатых заготовок квадратного сечения, штамповке листовых заготовок, и взаимосвязь нагрузок с геометрическими и прочностными характеристиками заготовки и изделия; а так же 2) влияние увеличения давления наполнителя на снижение потребных сил развиваемых пуансонами и подвижной матрицей в процессах гидроштамповки заготовок (и наоборот).

Для оценки величины напряжения текучести σ_s , использован метод течения И.П. Ренне, позволивший путём обработки деформированной координатной сетки, предварительно нанесённой на заготовку, определить интенсивность деформации и напряжение течения σ_s материала заготовки. Характер искажения координатной сетки (рис. 3) и распределение приращений интенсивности деформаций позволил сделать вывод об удовлетворительной сходимости геометрии очага деформации, принятого при математическом описании процессов, с экспериментально наблюдаемым.

В ходе исследований определялось также влияние сочетаний внешних нагрузок, накладываемых на заготовку (вариантов Γ -процесса), на распределение радиальной деформации стенок изделий, являющейся одной из важных характеристик их качества. При этом выявлена возможность управления, в определённых пределах, деформацией по толщине стенки штампуемых изделий путём управления внешними нагрузками и относительными скоростями перемещения пуансонов и подвижной матрицы.

Определённое внимание уделено выявлению причин и форм потери устойчивости деформируемых заготовок при варьируемых значениях внешних нагрузок и относительных скоростях перемещения подвижной матрицы и осевых пуансонов. Эти результаты позволили разработать мероприятия предупреждающие появление брака штампуемых изделий, сформулировать требования к заготовкам и установить возможность штамповки в крутоизогнутые изделия не только бесшовных но и сварных трубных заготовок.

В четвертой главе приведены результаты металлографических исследований крутоизогнутых изделий: макро- и микроструктуры, микротвёрдости характерных зон Γ - образных полуфабрикатов, определена плотность образцов вырезанных из различных зон изделий. При этом показано, что наиболее высокую плотность, превосходящую плотность исходной заготовки, имеют послеочаговые зоны изделий при незначительном уменьшении плотности материала в зоне очага пластической деформации заготовки. Исследования по определению поверхностных остаточных напряжений рентгеноструктурным методом, показали, что все зоны крутоизогнутых изделий характеризуются поверхностными напряжениями сжатия.

Металлографические исследования позволяют сделать вывод об отсутствии факторов снижающих надёжность изготовленных по Γ - процессу изделий в эксплуатации.

В пятой главе описан пресс-полуавтомат для гидроштамповки трубных и трубчатых заготовок, созданный на основе выполненных исследований (А.с.1708466). Пресс обладает достаточно широкими технологическими возможностями (рис.19), позволяя штамповать из трубчатых заготовок не только крутоизогнутые изделия со ступенчатой осью, но и изделия с пересекающимися осями (тройники, крестовины и т.п.), а также изделия с прямолинейной осью имеющие различные поперечные сечения.

Основные технические характеристики пресса-полуавтомата для гидроштамповки трубных заготовок

1. Геометрия штампуемых заготовок, мм:

Максимальная длина.....300

Максимальный диаметр:

а) при изготовлении тройников и т.п.....110

б) при изготовлении Γ - образных изделий42

Относительная толщина стенки (S/D_H).....0,5...0,01

2. Геометрия изготавливаемых Γ - образных изделий:

Минимальный относительный радиус колена ($R_{отн}$)0,01

Максимальный эксцентриситет (E_t), мм.....70

3. Сила смыкания неподвижной матрицы, кН.....1800

4. Сила смыкания подвижной матрицы, кН.....500

5. Ход траверсы пресса, м.....0,5

6. Цикл изготовления изделия, сек..... 40...60

7. Габариты (длина x ширина x высота - без гидростанции), м.....
.....1,5 x 1,2 x 2,8

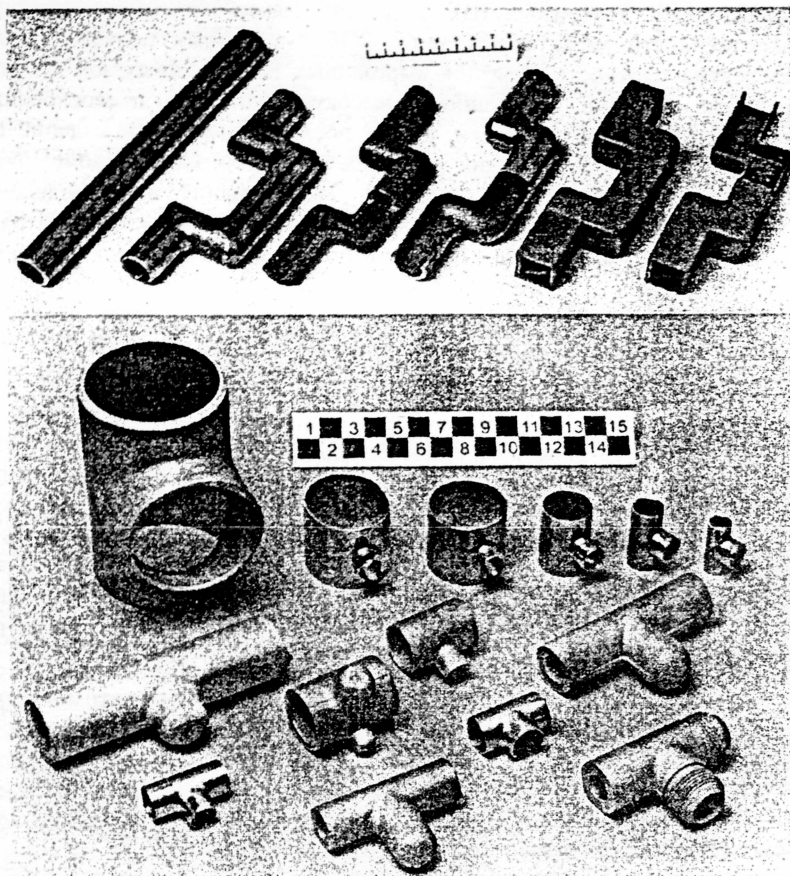


Рис. 19. Некоторые технологические возможности пресса-полуавтомата для гидроштамповки трубных заготовок

В приложении выполнен обзор научно-технической и патентной литературы по технологии и теории изготовления изделий с изогнутой и ступенчатой осью из листовых заготовок, рассмотрены способы интенсификации операции изгиба листовых заготовок, изложены теоретические исследования процессов деформирования на сверхмалый радиус листовых заготовок с привлечением $\perp$ - процесса (аналог процесса – изгиб узкой полосы на «ребро»).

Схема процесса приведена на рис.20. Разработана идеализированная модель деформирования листовой заготовки (рис.21), энергетическим методом получено выражение по определению внешних нагрузок необходимых для формоизменения листовой или полосовой заготовки в виде (при $\alpha = \pi/4$):

$$\frac{P_Z}{\sigma_s} + \frac{P_{Z'}}{\sigma_s} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ 2 + \frac{m}{HS} [S(2L_i + E_i) + H(2L_i + 2H + S)] \right\} \quad (9)$$

Выражение (9) показывает, что увеличивая давление на заготовку со стороны подвижной матрицы удаётся разгрузить осевые пуансоны и наоборот.

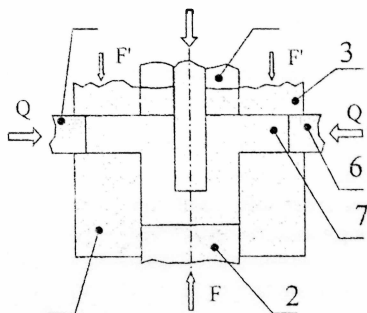


Рис.20. Схема процесса деформирования листовой полосы на ребро

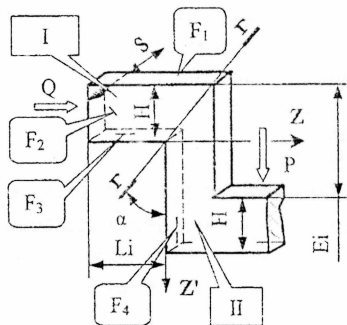


Рис.21. Расчетная схема деформирования листовой полосы

На рис. 22 приведена кривая изменения потребных относительных давлений, разрываемых осевыми пуансонами и подвижной матрицей в зависимости от относительной толщины деформируемой листовой (полосовой) заготовки, построенная по выражению (9). Из рис.22 видно,

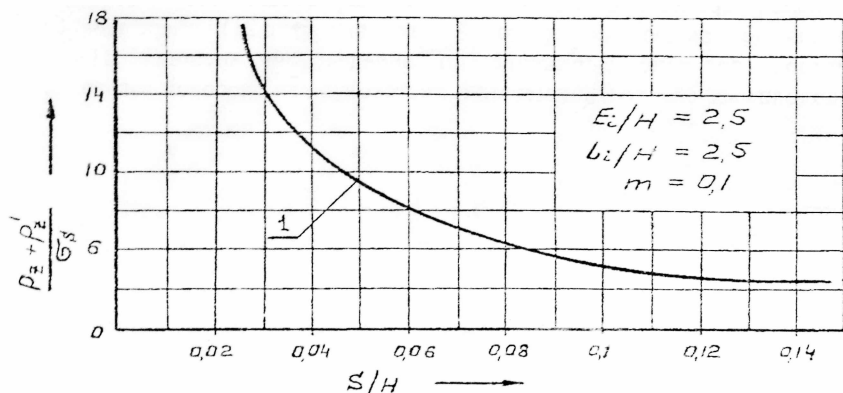


Рис.22. Характер изменения потребных относительных давлений, развиваемых осевыми пуансонами и подвижной матрицей в зависимости от относительной толщины заготовки

что с уменьшением относительной толщины деформируемой заготовки к последней необходимо приложить давления значительно превышающие напряжение текучести материала заготовки. Это ограничивает работоспособность штамповой оснастки и повышает вероятность разрушения заготовки. Устранение этого противоречия возможно, как следует из выражения (9), путём объединения при штамповке тонколистовых заготовок в пакет, представляющий собою в интегральной форме толстолистовую заготовку, потребные удельные нагрузки для штамповки которой существенно снижаются.

В приложении приведены также конструкции разработанного источника высокого давления – мультипликатора (А.с.967157), уплотнений высокого давления (А.с.941763), описана система их защиты от абразивного износа, приведен разработанный метод доводки плунжерных пар, нагруженных при работе высокими давлениями.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанных процессов и оборудования в промышленность составит 3...4 млн. руб. в год.

Основные результаты и выводы по работе

Анализ технологии и теории изготовления фитингов трубопроводов, включающих в себя полые изделия со ступенчатой (угольники и т.п.) и пересекающимися (тройники и т.п.) осями, имеющими радиус вогнутых поверхностей близкий к нулю, показал, что существующие технологические процессы недостаточно эффективны, а теория их штамповки из трубных заготовок развита недостаточно.

1. По изделиям со ступенчатой осью

Анализ современного состояния вопросов теории и практики деформирования трубных и трубчатых в изогнутые изделия показал, что технологические возможности широко распространенных в промышленности процессов изгиба заготовок лимитируются характером напряженно – деформированного состояния, при котором в очаге пластической деформации заготовки преобладают деформации растяжения – сжатия с поворотом сечений вокруг центра кривизны.

Задачу интенсификации процессов изгиба заготовок удастся решить путем наложения на заготовку нагрузок, обеспечивающих неравномерное всестороннее сжатие материала заготовки при отсутствии свободных поверхностей, исключив в очаге формоизменения заготовки деформации растяжения – сжатия и обеспечив деформацию материала путем сдвига.

Для практической реализации этой задачи разработан высокоэффективный процесс гидроштамповки трубных и трубчатых заготовок в изделия со ступенчатой осью, обеспечивающий выполнение вышеперечисленных условий деформирования заготовки и включающий в себя сдвиг срединной части или концевых участков заготовки относительно ее первоначальной оси (А.с.1021060).

При этом промышленная реализация процесса требует решения комплекса научно -технических задач, основными из которых являются:

- разработка метода проектирования технологических процессов гидроштамповки трубных заготовок ;
- теоретические и экспериментальные исследования процесса;
- разработка промышленного оборудования.

Для решения этих задач:

1.1. Разработаны теоретические основы процесса гидроштамповки трубных и трубчатых заготовок в изделия со ступенчатой осью, базирующиеся на кинематически возможных моделях деформирования заготовки, состоящей из жестких блоков, предложены две математические модели очага пластической деформации заготовки (идеализированная и блочная), позволившие в результате их анализа энергетическим методом:

- установить общие, для различных вариантов наложения деформирующих нагрузок на заготовку (вариантов процесса), взаимосвязи силовых параметров процессов с механическими свойствами материала заготовок (с учетом упрочнения материала), геометрическими характеристиками заготовок и изделий, условиями контактного трения, при этом:
- установить влияние коэффициента переходности изготавливаемых полых крутоизогнутых изделий на силовые параметры процессов гидроштамповки трубных и трубчатых заготовок разработанным способом;
- установить влияние ориентации поверхностей деформируемых трубчатых заготовок (например, прямоугольного, ромбовидного и иных сечений) относительно плоскости деформирования на силовые параметры процессов;
- установить влияние относительного радиуса колен и требуемой их геометрии на величину внешних нагрузок, накладываемых на деформируемую заготовку;
- сформулировать практические рекомендации по разработке технологических процессов гидроштамповки разнопроходных крутоизогнутых изделий из трубных и трубчатых заготовок, позволяющие снизить нагрузки, накладываемые на заготовку осевыми пуансонами (А.с.1771844);
- установить возможность изготовления пустотелых многоступенчатых деталей относящихся к классу эксцентриковый вал, коленвал, распредвал и т.п.;
- разработать научную классификацию процессов, основанную на объективных критериях их общности: характере напряжений, действующих на границе очага деформации с деформированной частью заготовки и вариантах наложения внешних нагрузок на заготовку.

Эти результаты позволяют ставить и решать различные задачи, связанные как с оценкой вариантов наложения внешних нагрузок на деформируемую заготовку, так и положением заготовки относительно плоскости деформирования, и на этой основе обеспечивать рациональный выбор технологических и иных параметров для широкого комплекса разновидностей процесса деформирования трубных и трубчатых заготовок в равно- и разнопроходные крутоизогнутые изделия.

2. По изделиям с пересекающимися осями

Анализ состояния теории и практики изготовления изделий с пересекающимися осями (тройников и т.п.) показал недостаточность развития теоретической базы процессов в части выявления взаимного влияния силовых параметров гидроштамповки трубной заготовки, как между

собою, так и в зависимости от геометрических соотношений корпуса тройника и отвода.

Для решения этой задачи:

2.1. Выполнен теоретический анализ процессов гидроштамповки тройников, базирующийся на кинематически возможной модели деформирования заготовки, состоящей из жестких блоков. предложена математическая модель очага пластической деформации позволившая в результате ее анализа энергетическим методом:

- установить общую, для различных вариантов наложения нагрузок на заготовку, взаимосвязь силовых параметров гидроштамповки с механическими и геометрическими характеристиками заготовок и изделий, условиями контактного трения, при этом:
- установить влияние коэффициента переходности изготавливаемого изделия и относительной толщины стенки заготовки на силовые параметры процессов.

3. На основе анализа системы деформируемая заготовка-штамп инженерным методом определены пассивные силы, необходимые для реализации процессов (в частности силы смыкания подвижных и неподвижных полуматриц и т.п.).

Эти результаты позволяют выполнить анализ и на его основе выбрать оптимальные, для разрабатываемого устройства, варианты разъема полуматриц, диктующих как компоновку, так и энергосиловые параметры устройств, реализующих процессы гидроштамповки.

4. Разработаны экспериментальное оборудование, штамповая оснастка, апробированы устройства и технологические приемы, направленные на повышение надежности работы оборудования, выполнен комплекс экспериментальных исследований процессов, позволивший:

- установить области применения математических моделей (идеализированной схемы и блочной модели деформирования) при определении силовых параметров процессов, гидроштамповки ступенчатых изделий, реализуемых при различных вариантах наложения внешних нагрузок на заготовку. При этом разность теоретических и экспериментальных данных не превышала 15...20%.
- подтвердить результаты теоретических исследований о взаимосвязи внешних нагрузок, потребных для гидроштамповки трубных и трубчатых заготовок, установить технологические возможности различных вариантов процесса, в том числе возможность изготовления ступенчатых изделий с радиусом вогнутой поверхности колен близким к нулю.

4.1. Экспериментальные исследования деформированного состояния крутоизогнутых изделий методом течения позволили:

- установить адекватность геометрии очагов пластической деформации заготовок, принятых при теоретическом анализе, с экспериментально установленными;
- оценить напряжение текучести (σ_s) материала деформируемой заготовки в результате ее формоизменения;
- установить влияние вариантов наложения внешних нагрузок, прикладываемых к деформируемой заготовке, на геометрические характеристики изделия, в том числе радиальные деформации его стенок.

4.2. Разработаны требования к материалам заготовок для гидроштамповки, установлена возможность изготовления крутоизогнутых изделий не только из цельнотянутых, но и сварных трубных заготовок.

4.3. Экспериментально установлены основные виды потери устойчивости, сопровождающие процессы деформирования листовых, трубных и трубчатых заготовок по π -процессу, выявлены факторы, влияющие на потерю устойчивости заготовок, разработаны мероприятия как по предупреждению брака штампуемых изделий, так и предотвращению технических и технологических отказов при реализации процессов.

5. Выполненные металлографические исследования крутоизогнутых изделий позволили установить на основании анализа макро- и микроструктуры, распределения микротвердости, плотности материала характерных зон изделий, остаточных поверхностных напряжений, отсутствие факторов снижающих надежность изделий, изготовленных исследованными способами, в эксплуатации.

6. Выполненный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил поставить на научную основу проектирование технологических процессов изготовления полых изделий со ступенчатой осью, уточнить теоретическую базу для процессов изготовления полых изделий с пересекающимися осями и разработать пресс-полуавтомат обеспечивающий:

- штамповку листовых, прутковых, сложнопрофильных заготовок в крутоизогнутые изделия;
- гидроштамповку трубных, трубчатых заготовок различного сечения в крутоизогнутые изделия со ступенчатой осью, пересекающимися осями и имеющих прямолинейную ось, но различные радиальные сечения.

Совокупность приведенных теоретических и экспериментальных исследований, разработка и освоение промышленного оборудования для реализации исследованных процессов позволяют решить крупную научно-техническую задачу разработки метода проектирования технологических процессов и оборудования гидроштамповки трубных и трубчатых заготовок в изделия со ступенчатой и пересекающимися осями, имеющую важное народнохозяйственное значение.

Основные положения диссертации изложены в работах

1. А.с. 1021060 СССР, МКИ В21С 37/26. Способ изготовления крутоизогнутых изделий из трубных заготовок / А.С. Матвеев, Е.А. Антонов, Н.И. Никонов и др. 1983.– д.с.п.
2. Матвеев А.С. Гидромеханическая штамповка крутоизогнутых изделий из трубных заготовок // Совершенствование технологии и оборудования штамповочного производства в авиастроении. –Ярославль: ЯПИ, 1986. – С.18-19.
3. Матвеев А.С. Экспериментальная установка и штамповая оснастка для деформирования трубных заготовок в крутоизогнутые изделия //Ресурсосберегающая технология и оборудование штамповочного производства в авиастроении: Сб. науч. тр. –Ярославль, 1989. - С.133-136.
4. А.с. 1771844 СССР, МКИ В21с 26/22. Способ изготовления разнопроходных крутоизогнутых угольников из трубчатых заготовок / А.С. Матвеев // Б.И. – 1993. – № 30.
5. Матвеев А.С., Антонов Е.А. Определение силовых параметров процессов гидроштамповки трубных заготовок в крутоизогнутые изделия // Кузнечно – штамповочное производство. – 1991.– №11. – С. 7 – 10.
6. Матвеев А.С. Некоторые технологические возможности и особенности деформирования тонколистовых и иных заготовок на ребро //Материалы Всероссийской научно – техн. Конференции «Повышение эффективности механообработки на основе аналитического и экспериментального моделирования процессов» – Рыбинск, 1999. - С.3 - 4.
7. Матвеев А.С. Гидроштамповка крутоизогнутых изделий из трубных заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. – 2003.– №8. – С. 15 – 23.
8. Матвеев А.С. Экспериментальные исследования процессов гидроштамповки крутоизогнутых изделий из трубных заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. – 2003.– №10. – С.27 – 33.
9. Матвеев А.С. Деформирование полосовых заготовок в ступенчатые изделия // Заготовительные производства в машиностроении. – 2004. – №9. – С.24-29.
10. Матвеев А.С., Антонов Е.А. Гидроштамповка трубных заготовок в крутоизогнутые изделия // Материалы межотраслевой конференции «Разработка малоотходной технологии и создание высокопроизводительного оборудования для специализированного производства отводов к трубопроводам изделий и технологических установок» - Москва: 1992.–С.14-16.
11. Матвеев А.С., Антонов Е.А. Влияние геометрии очага пластической деформации на силовые параметры процесса гидромеханической штамповки крутоизогнутых изделий из трубных заготовок //Ресурсосберегающие технологии и оборудование штамповочного производства в авиастроении: Сб

- научн. тр. –Ярославль, 1989. – С.133-136.
12. Матвеев А.С., Антонов Е.А. К вопросу деформирования на сверхмалый радиус листовых и объёмных заготовок // Теория, технология, оборудование и автоматизация обработки металлов давлением и резанием: Сб. научн. тр. –Тула. – 1999. Вып. 2. – С. 20-27.
 13. Матвеев А.С., Антонов Е.А. Гидроштамповка разнопроходных крутоизогнутых изделий из трубных заготовок. Материалы российской научно-технической конференции // Новые материалы, прогрессивные технологические процессы и управление качеством в заготовительном производстве. – Рыбинск, 2002 г., - С. 12-16.
 14. Антонов Е.А., Матвеев А.С. Гидроштамповка крутоизогнутых изделий из трубных заготовок // Листовая горячая объёмная штамповка: Материалы семинара. - Москва, 1991. – С.38-40.
 15. Антонов Е.А., Матвеев А.С. Гидроштамповка квадратных и прямоугольных в сечении трубчатых заготовок в крутоизогнутые изделия. // Развитие производственных технологий в вузах России. Сб. научно-техн. статей.– Москва, 1999. Вып. 2. – С.68-69.
 16. Антонов Е.А., Матвеев А.С. Изготовление крутоизогнутых угольников из трубных заготовок // Авиационная промышленность. –1989. – №8 – С.28-30.
 17. Антонов Е.А., Матвеев А.С. Гидромеханическая штамповка трубных заготовок в крутоизогнутые изделия // Кузнечно-штамповочное производство. –1988.– №8. – С.24-27.
 18. Антонов Е.А., Матвеев А.С. Штамповка крутоизогнутых изделий из трубных заготовок // Материалы зональной конференции «Опыт освоения новой техники, оснастки, материалов в кузнечно-штамповочном производстве». –Пенза, 1988. – С.20-21.
 19. Антонов Е.А., Матвеев А.С. Исследование процессов формообразования крутоизогнутых изделий из трубных заготовок //Материалы зональной научно – технической конференции «Прогрессивные малоотходные технологии холодно-штамповочного производства» - Челябинск, 1988. – С.24-25.
 20. Антонов Е.А., Матвеев А.С. Гидравлическая штамповка полых деталей из трубных заготовок // Материалы зональной научно – технической конференции «Повышение эффективности производства, автоматизация технологических процессов, вспомогательных и транспортных операций в машиностроении» –Ярославль, 1981.- С.19-20.
 21. А.с. 1708466 СССР, МКИ В21 с 26/22 Устройство для гидравлической штамповки полых изделий / А.С. Матвеев, Е.А. Антонов, Н.И. Никонов // Б.И. – 1992. – №4.
 22. А.с. 916010 СССР, МКИ В21С 37/29 Устройство для гидравлической штамповки полых деталей / А.С. Матвеев, М.В. Собенин, Н.И. Никонов // Б.И. – 1982. – № 12.