

Кузин Александр Олегович

**СНИЖЕНИЕ ПРУЖИНЕНИЯ ПРИ ДВУХУГЛОВОЙ ГИБКЕ
ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКЕ**

2.5.7. – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

Научный руководитель:

Ерисов Ярослав Александрович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», кафедра обработки металлов давлением, профессор.

Официальные оппоненты:

Марковцев Владимир Анатольевич, доктор технических наук, профессор, АО «Ульяновский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства», генеральный директор;

Типалин Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», кафедра «Обработка металлов давлением и аддитивных технологий», профессор.

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет» (г. Тула).

Защита состоится 19 апреля 2024 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.05, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте https://ssau.ru/resources/dis_protection/kuzin.

Автореферат разослан «__»_____2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

Я. А. Ерисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Холодная листовая штамповка является широко распространенной и прогрессивной разновидностью технологии обработки металлов давлением, использующей в качестве исходной заготовки листовой материал (лист, полоса, лента). Одной из основных операций холодной штамповки является гибка.

Гибка – это формообразующая операция, при которой изменяется кривизна в одном или нескольких участках заготовки. Гибка листового металла осуществляется в результате упругопластической деформации, протекающей с каждой из сторон изгибаемой заготовки.

Основной проблемой при получении деталей гибкой является упругое пружинение. Величина упругого пружинения зависит от упругих и пластических свойств материала, степени деформации, угла и способа гибки. Учесть все параметры достаточно точно не всегда возможно и поэтому, чтобы получить качественные детали требуются дополнительные операции (калибровка, предварительный нагрев оснастки) или создание определенных условий при гибке (соблюдение зазора между кромками матрицы и пуансона). Все это приводит к усложнению конструкции штампов и их удорожанию.

В данной работе показана возможность компенсации упругого пружинения при двухугловой гибке простым и экономичным способом. Для этого предлагается использовать штамп с упругими планками, которые на протяжении всего процесса гибки плотно прижимают заготовку к пуансону, тем самым компенсируя угол пружинения. Планки выполнены из высокоуглеродистой стали под соответствующим углом, равным углу пружинения материала заготовки. Пуансон выполняют с соответствующим поднутрением. При движении пуансона вниз выталкиватель, который держит планки в исходном прямом положении опускается, упругие планки начинают прижимать вертикальные полки заготовки к пуансону, создавая дополнительную нагрузку на заготовку. При обратном ходе выталкиватель выводит заготовку из матрицы. Разработанная модель штампа с упругими планками предназначена для углагиба не более 90° .

Проектирование штамповой оснастки для гибки в соответствии с предлагаемым новшеством связано с математическим и конечно-элементным моделированием изгиба заготовки, включая упругое пружинение. В процессе гибки область приложения нагрузки перемещается как относительно заготовки, так и контактирующей с ней поверхностями упругих планок. Нестандартный характер перечисленных особенностей указывает на необходимость глубокой теоретической проработки и экспериментальной проверки предлагаемого способа.

В связи с этим, проведенные в диссертации исследования процесса гибки плоских деталей в штампе с упругими планками являются актуальными с точки зрения дальнейшего совершенствования технологии производства.

Степень разработанности темы. В настоящее время накоплен достаточный объем данных по исследованию процессов холодной листовой штамповки, в частности, гибки. Изучению в теории упругости чистого изгиба посвящены работы А.А. Ильюшина, В.А. Лазаряна, Н.Н. Малинина, И.П. Ренне, А.Ю. Ишлинского и других. В изучение теории гибки листовых материалов существенный вклад внесли В.П. Романовский, Л.И. Рудман, М.В. Сторожев, Е.А. Попов, А.Д. Комаров, С.И. Губкин и другие. Изучению стесненного изгиба посвящены работы М.И. Лысова и Н.В. Сосова. В вопросы, связанные с анизотропией материалов, внесли существенный вклад С.П. Яковлев, С.С. Яковлев, Р. Хилл, Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников и М.Е. Зубцов. Однако, в работах указанных авторов не рассматриваются вопросы совместного влияния деформационного упрочнения, анизотропии и утонения заготовки при гибке, влияния упругих элементов на снижение упругого пружинения в штамповой оснастке для двухугловой гибки; не исследовано напряженно-деформированное состояние заготовки и упругих планок штамповой оснастки для двухуг-

ловой гибки. Поэтому в данной работе указанные проблемы будут рассмотрены более подробно.

Область исследования соответствует п. 4 «Технологииковки, прессования, листовой и объемной штамповки и комплексных процессов с обработкой давлением, например, непрерывного литья и прокатки заготовок» и п. 6 «Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости штампового инструмента» паспорта специальности 2.5.7. – Технологии и машины обработки давлением.

Объект исследования: процесс двухугловой гибки плоских заготовок.

Предмет исследования: влияние деформационного упрочнения, анизотропии и утонения заготовки, упругих элементов штамповой оснастки на технологические параметры и ограничения процесса двухугловой гибки.

Целью диссертационного исследования является снижение величины упругого пружинения при двухугловой гибке деталей за счет применения упругих элементов в конструкции штамповой оснастки.

Для достижения поставленной цели в диссертации определены следующие **задачи исследования:**

1. Разработать аналитическую модель гибки листовых материалов, учитывающую утонение заготовки, пластическую анизотропию свойств и деформационное упрочнение заготовки.

2. Разработать способ двухугловой гибки с использованием упругих элементов в штамповой оснастке.

3. Провести теоретический и конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния упругих элементов штамповой оснастки и заготовки в процессе гибки с целью определения конструкторско-технологических параметров и предельных возможностей процесса двухугловой гибки с упругими элементами.

4. Провести экспериментальные исследования процесса двухугловой гибки в штамповой оснастке с упругими элементами для проверки результатов моделирования и оценки применимости процесса для формообразования различных материалов.

5. Разработать методику проектирования технологического процесса двухугловой гибки в штамповой оснастке с упругими элементами.

6. Провести опытно-промышленную апробацию разработанного способа и методики его проектирования и осуществить внедрение способа в производство.

Методы исследования. В работе использован комплексный метод исследований, включающий теоретические исследования, компьютерное моделирование методом конечных элементов и экспериментальную проверку полученных результатов в лабораторных условиях. Анализ напряженно-деформированного состояния при двухугловой гибке проводился с использованием лицензионного программного комплекса DEFORM-2D. Теоретические исследования при разработке способа двухугловой гибки базировались на основных положениях теории упругости и пластичности, теории пластического деформирования листовых материалов.

При определении механических свойств деформируемых материалов использовалось современное испытательное оборудование Самарского университета, в частности, растяжная машина TiniusOlsen H5KT. Экспериментальные исследования процесса гибки осуществлялись в лабораторных условиях на испытательной машине TIRAtest 2830 с использованием системы бесконтактного измерения деформации Vic-3D. Результаты экспериментальных исследований обрабатывались с применением методов математической статистики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана аналитическая модель гибки листовых материалов, позволяющая комплексно учесть влияние утонения заготовки, пластической анизотропии свойств и деформационного упрочнения заготовки.

2. Разработан способ двухугловой гибки плоской заготовки, позволяющий снизить упругое пружинение детали за счет использования в конструкции штамповой оснастки упругих элементов.

3. Выведены аналитически и подтверждены экспериментально зависимости, позволяющие проводить расчеты геометрических размеров упругих планок для компенсации пружинения по заданным толщине и материалу заготовки, материалу упругих элементов.

4. Выявлены особенности напряженно-деформированного состояния и закономерности двухугловой гибки в штампе с упругими элементами, позволяющие догибать полки детали на заданный угол.

5. Разработана и внедрена методика проектирования штамповой оснастки для двухугловой гибки П-образных деталей с использованием упругих планок, позволяющих снизить упругое пружинение.

Новизна предложенного способа и устройства для двухугловой гибки подтверждается полученным патентом на полезную модель (РФ №153887, Штамп для гибки листового материала).

Теоретическая значимость работы:

1. Разработана аналитическая модель гибки листовых материалов, учитывающая утонение, пластическую анизотропию свойств и деформационное упрочнение заготовки и позволяющая проводить расчеты напряженно-деформированного состояния заготовки, предельных деформаций, силовых параметров процесса, упругого пружинения при разгрузке.

2. Выведенные аналитически и подтвержденные экспериментально зависимости позволяют проводить расчеты угла, толщины, радиуса загиба и высоты упругих планок, обеспечивающих требуемую компенсацию пружинения по заданным параметрам процесса гибки, толщине и свойствам материала анизотропной упрочняющейся заготовки, упругим свойствам материала планок.

3. Выявленные особенности напряженно-деформированного состояния и закономерности двухугловой гибки в штампе с упругими элементами позволяют управлять величиной пружинения детали.

Практическая значимость работы:

1. Разработанный способ двухугловой гибки П-образных деталей в штамповой оснастке с упругими элементами позволяет исключить дополнительные технологические операции, а значит и дополнительные затраты за счет снижения упругого пружинения.

2. Спроектирована и изготовлена универсальная штамповая оснастка с набором упругих планок, предназначенная для двухугловой гибки заготовок различной толщины из различных сталей и сплавов.

3. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны и внедрены в производство руководяще-технические материалы, содержащие рекомендации по реализации разработанного способа гибки, конструкции штамповой оснастки, режимам гибки, техническим требованиям к изделиям.

Положения, выносимые на защиту:

1. Аналитическая модель гибки листовых материалов, впервые учитывающая совместное влияние утонения заготовки, пластической анизотропии свойств и деформационного упрочнения заготовки на геометрические, силовые и предельные параметры процесса кругового изгиба.

2. Способ снижения упругого пружинения при двухугловой гибке плоских заготовок на угол не более 90° , заключающийся в применении упругих элементов в конструкции штампа.

3. Закономерности процесса двухугловой гибки анизотропной упрочняющейся заготовки в штампе с упругими элементами, полученные на основании теоретических и экспериментальных исследований процесса, позволяющие проводить конструкторско-технологические расчеты упругих планок для компенсации пружинения детали, в том числе с учетом ее утонения при изгибе.

4. Методика проектирования технологического процесса и штамповой оснастки для двухугловой гибки плоских заготовок по новому способу, обеспечивающему компенсацию упругого пружинения.

Достоверность результатов обеспечивается обоснованностью использованных теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью поставленных задач, применением известных математических методов и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, полученными как лично автором, так и в других исследованиях, а также апробацией результатов работы в промышленности, проведенной при широком диапазоне режимов гибки.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследований, разработанная и изготовленная штамповая оснастка, руководяще-технические материалы внедрены на ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», что подтверждается актом внедрения.

Апробация работы. Основные результаты исследований, проведенных в работе, докладывались и обсуждались на Международной конференции «Современные технологии и материалы новых поколений», г. Томск, 2017 г., Международной молодежной научной конференции «XLIV Гагаринские чтения», г. Москва, 2018 г., IV Международной научно-производственной конференции, приуроченной ко Дню Российской науки и 35-летию АО «Ульяновский НИАТ», г. Ульяновск, 2019 г., Международной молодежной научной конференции «XLVI Гагаринские чтения», г. Москва, 2020 г., Международной молодежной научной конференции «XVI Королевские чтения», г. Самара, 2021 г.

Связь с государственными программами и НИР. Диссертация выполнена в рамках гранта Президента МД-936.2022.4.

Публикации. По результатам научных исследований, изложенных в диссертации, опубликовано 14 работ, в том числе 5 научных статей опубликованы в изданиях, входящих в Перечень, рекомендованный ВАК Минобрнауки России; 3 статьи - в изданиях, индексируемых базой Scopus/Web of Science, получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа выполнена на 137 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок, 2 таблицы и 1 приложение. Список литературы содержит 89 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определена цель и поставлены основные задачи, дана краткая характеристика работы, включающая научную новизну, теоретическую и практическую значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассмотрено современное состояние теории и технологии двухугловой гибки.

Детали, полученные двухугловой гибкой, входят в конструкцию изделий различного назначения и составляют в машиностроении по номенклатуре и объему один из наиболее распространенных классов. Самым распространенным дефектом при гибке является отклонение угла загиба от заданного вследствие пружинения.

Несмотря на большое разнообразие подходов к расчету упругого пружинения при гибке на данный момент ни один из них не позволяет комплексно учесть влияние анизотропии свойств заготовки, ее деформационного упрочнения и утонения.

Анализ существующих схем П-образной гибки показал, что для компенсации пружинения требуется применение гибочных штампов сложной конструкции, что снижает их производительность и надежность. Применение же специального оборудования не всегда возможно из-за его высокой стоимости. При этом не все схемы позволяют регулировать уголгиба для компенсации пружинения при формообразовании заготовок, отличающихся разбросом свойств, без кардинальной переналадки штампа и изготовления новых элементов. Кроме того, не существует схем, обеспечивающих параллельность стенок П-образных изделий без повреждения поверхности заготовок простыми и приемлемыми для широкой практики средствами.

Для поиска новых способов совершенствования элементов штамповой оснастки, обеспечивающих снижение упругого пружинения, рассмотрено применение упруго-деформируемых элементов. Несмотря на перспективность данного подхода существующие способы не обеспечивают в полной мере управления углом пружинения, не дают возможность влиять на него после завершения гибки, не обеспечивают универсальности способа гибки.

Во второй главе разработана и экспериментально верифицирована аналитическая модель гибки листовых материалов, учитывающая утонение, пластическую анизотропию свойств и деформационное упрочнение заготовки и позволяющая проводить расчеты напряженно-деформированного состояния заготовки, предельных деформаций, силовых параметров процесса, упругого пружинения при разгрузке.

С использованием подхода Г.А. Смирнова-Аляева получена система уравнений, связывающая интенсивности деформаций на выпуклой (наружной) ε_{iH} , вогнутой (внутренней) ε_{iB} и нейтральной по напряжениям ε_{iv} поверхностях при гибке:

$$\begin{cases} \frac{d\varepsilon_{iB}}{d\varepsilon_{iH}} = \frac{e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iB}} - e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iv}}}{e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iv}} - e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iH}}}, \\ (\varepsilon_0 + \varepsilon_{iH})^{n+1} + 2(\varepsilon_0 + \varepsilon_{iv})^{n+1} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{iB})^{n+1} - 2\varepsilon_0^{n+1} = 0, \\ \varepsilon_{iB} = 0 \text{ при } \varepsilon_{iH} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где ε_0 – степень упругой деформации, при которой достигается предел текучести; n – показатель упрочнения, β – коэффициент Лоде, который одинаков для зоны растяжения и зоны сжатия и зависит только от анизотропии. Так для плоского деформированного состояния, если направление прокатки перпендикулярно ребругиба, то

$$\beta_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu_{12}\mu_{21}}}; \quad (2)$$

а если направление прокатки параллельно ребругиба, то

$$\beta_{\parallel} = \frac{\sqrt{\mu_{12}}}{\sqrt{\mu_{21}(1 - \mu_{12}\mu_{21})}}. \quad (3)$$

где μ_{12} и μ_{21} – коэффициенты поперечной деформации для поперечного направления и направления прокатки исходной листовой заготовки.

Принимая одну из переменных ε_{iv} , ε_{iH} или ε_{iB} за независимый аргумент, а две другие – за искомые неизвестные, и численно решая систему (1), можно определить функциональные зависимости этих двух неизвестных переменных от той переменной, которую приняли за аргумент. Далее для любой такой комбинации можно вычислить геометрические параметры и напряженное состояние процесса изгиба (таблица 1).

Таблица 1 – Уравнения для расчета геометрических параметров и напряжений при гибке

Параметр	Уравнение
Радиус кривизны внутренней поверхности	$\frac{r_B}{S_0} = \frac{2e^{-\frac{1}{\beta}\varepsilon_{iB}}}{e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iH}} - e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iB}}} \quad (4)$
Радиус кривизны нейтрального слоя по напряжениям	$\frac{\rho_H}{S_0} = \frac{2e^{-\frac{1}{\beta}\varepsilon_{iv}}}{e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iH}} - e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iB}}} \quad (5)$
Радиус кривизны нейтрального слоя по итоговой деформации	$\frac{\rho_0}{S_0} = \frac{2}{e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iH}} - e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iB}}} \quad (6)$
Изменение толщины заготовки	$\frac{S}{S_0} = \frac{2}{e^{\frac{1}{\beta}\varepsilon_{iH}} + e^{-\frac{1}{\beta}\varepsilon_{iB}}} \quad (7)$
Радиальные напряжения	$\left[\begin{array}{l} \sigma_r = - \int_{\beta \ln \frac{\rho_0}{r}}^{\varepsilon_{iB}} \sigma_i d\varepsilon_i \text{ при } r_B \leq r \leq \rho_H, \\ \sigma_r = - \int_0^{\beta \ln \frac{\rho_0}{r}} \sigma_i d\varepsilon_i - \int_0^{\varepsilon_{iH}} \sigma_i d\varepsilon_i \text{ при } \rho_H \leq r \leq \rho_0, \\ \sigma_r = - \int_{\beta \ln \frac{r}{\rho_0}}^{\varepsilon_{iH}} \sigma_i d\varepsilon_i \text{ при } \rho_0 \leq r \leq r_H \end{array} \right. \quad (8)$
Здесь S_0 – толщина заготовки, r_H – радиус кривизны наружной поверхности, σ_i – интенсивность напряжений, ε_i – интенсивность деформаций, r – радиус кривизны срединной поверхности.	

Величину изгибающего момента определили как сумму моментов, создаваемых тангенциальными напряжениями σ_θ по толщине заготовки:

$$\frac{M_H}{2BS_0^2} = \frac{A}{\left(e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iH}} - e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iB}}\right)^2} \left[\int_0^{\varepsilon_{iH}} (\varepsilon_o + \varepsilon_i)^n e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i + \right. \quad (9)$$

$$\left. + 2 \int_0^{\varepsilon_{iv}} (\varepsilon_o + \varepsilon_i)^n e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i - \int_0^{\varepsilon_{iB}} (\varepsilon_o + \varepsilon_i)^n e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i \right],$$

где A – показатель упрочнения, B – ширина заготовки.

Для определения упругой отдачи листового металла после гибки использовали зависимость, связывающую изменение угла изгиба $\Delta\alpha$ при разгрузке с изменением кривизны срединной поверхности заготовки:

$$\Delta\alpha = 3A \frac{1 - \vartheta^2}{E} \frac{e^{\frac{1}{\beta}\varepsilon_{iH}} + e^{-\frac{1}{\beta}\varepsilon_{iB}}}{\left(e^{\frac{1}{\beta}\varepsilon_{iH}} - e^{-\frac{1}{\beta}\varepsilon_{iB}}\right)^3} \left[\int_0^{\varepsilon_{iH}} (\varepsilon_o + \varepsilon_i)^n e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i + \right. \quad (10)$$

$$\left. + 2 \int_0^{\varepsilon_{iv}} (\varepsilon_o + \varepsilon_i)^n e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i - \int_0^{\varepsilon_{iB}} (\varepsilon_o + \varepsilon_i)^n e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i \right],$$

где ϑ – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости материала заготовки.

С использованием подхода А.Д. Томленова определена критическая интенсивность деформации ε_{iH}^{kp} на наружной поверхности, при которой начинается локализация деформации и последующее разрушение:

$$\varepsilon_{iH}^{kp} = \beta n - \varepsilon_0. \quad (11)$$

С использованием выведенных выражений выявлены закономерности влияния упрочнения и анизотропии заготовки на деформационные и геометрические параметры при гибке. Увеличение показателя упрочнения приводит к смещению радиусов нейтральных поверхностей по напряжениям и итоговой деформации к внутренней (вогнутой) поверхности, что приводит к более интенсивному уменьшению толщины заготовки (рисунок 1, а). Установлено, что пластическая анизотропия не оказывает влияния на геометрические параметры процесса гибки – положение нейтральных поверхностей по напряжениям и итоговой деформации, а также утонение заготовки. Момент, необходимый для пластического изгиба упрочняющейся заготовки, увеличивается в процессе деформирования, сопровождающегося увеличением кривизны (рисунок 1, б).

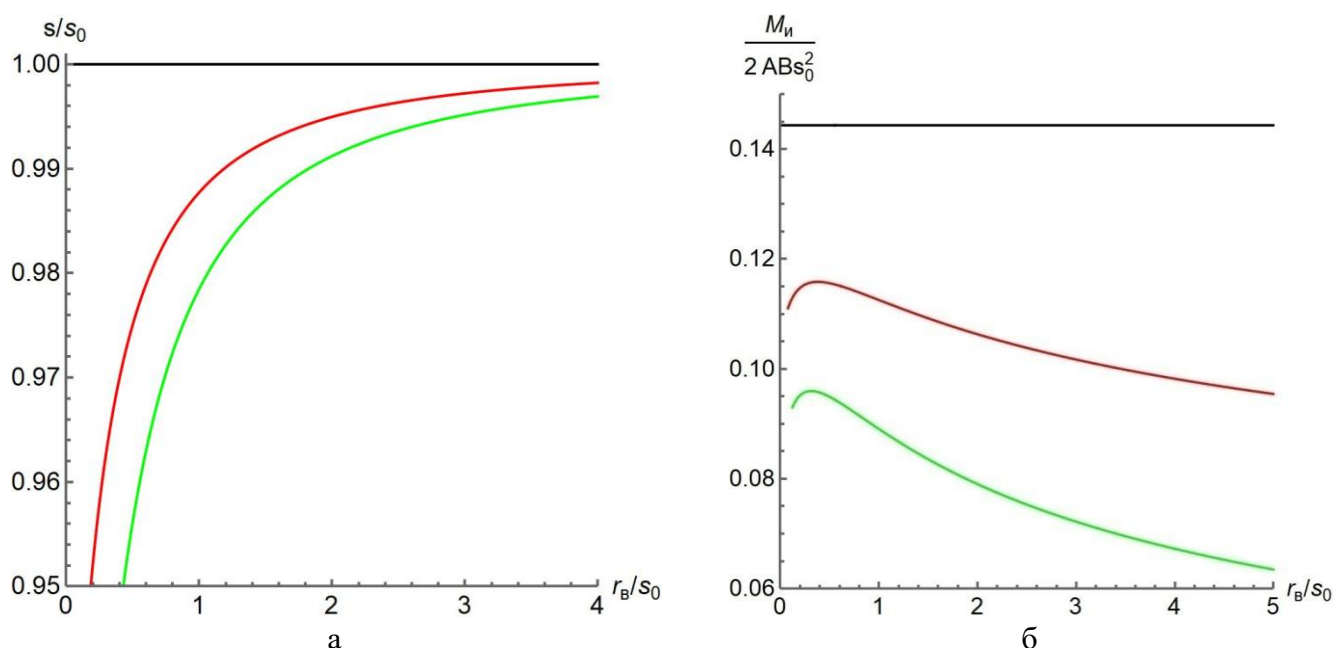


Рисунок 1 – Влияние упрочнения на утонение (а) и изгибающий момент (б) при гибке изотропной заготовки (черный – $n = 0$, красный – $n = 0,15$, зеленый – $n = 0,30$)

Угол упругого пружинения уменьшается при увеличении показателя упрочнения, что связано с увеличением напряжений, вызванных пластическими деформациями, по сравнению с величиной напряжений от упругих деформаций (рисунок 2). В зависимости от величины коэффициента Лоде β угол пружинения анизотропной заготовки может быть больше (при $\beta > 1,15$) или меньше (при $\beta < 1,15$), чем изотропной.

Установлено, что с увеличением отношения предела текучести $\sigma_{0,2}$ к пределу прочности σ_b , относительного равномерного удлинения δ_p и коэффициента Лоде β увеличивается предельная деформация ε_{iH}^{kp} , то есть гибку без разрушения можно проводить на меньший радиус. При этом δ_p и β оказывают более значительное влияние на увеличение предельной деформации чем $\sigma_{0,2}/\sigma_b$. В зависимости от величины показателей анизотропии, критическая интенсивность деформаций может быть как больше, так и меньше значения, соответствующего изотропному материалу.

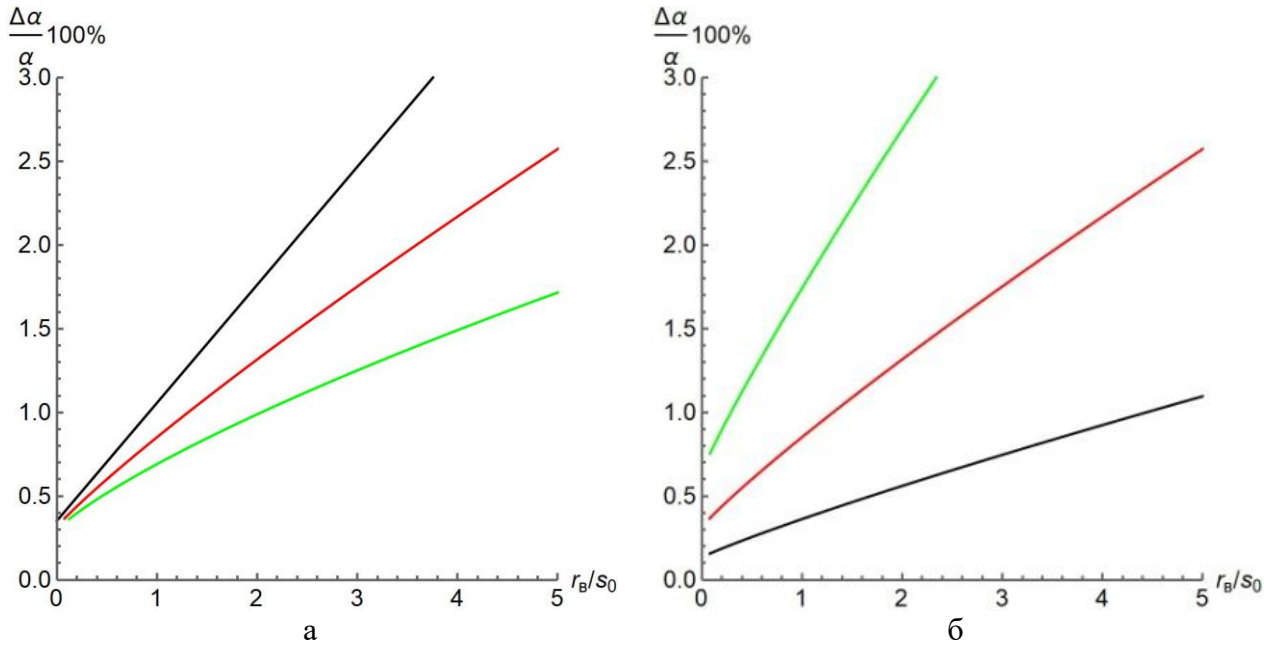


Рисунок 2 – Влияние упрочнения (а) и анизотропии (б) на угол пружинения (черный – $\beta = 0,55$, красный – $\beta = 1,15$, зеленый – $\beta = 2,15$)

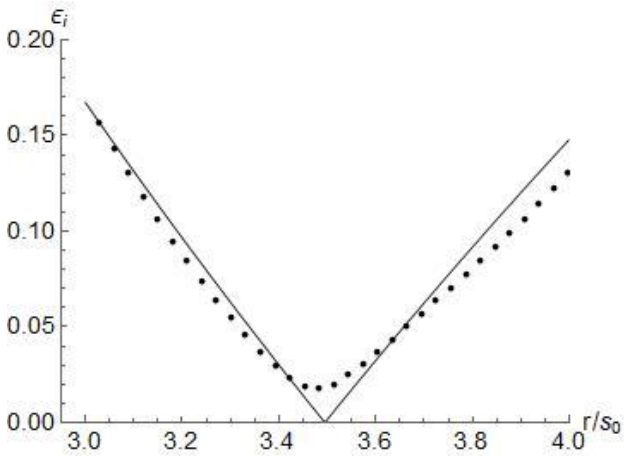


Рисунок 3 – Сравнение результатов расчета (линии) и экспериментальных измерений (точки) интенсивности деформаций по толщине заготовки

Верификация математической модели проводилась путем сравнения величины и распределения деформаций по толщине заготовки при $r_B/S_0 = 3$, рассчитанных теоретически и измеренных бесконтактным методом. Как видно из рисунка 3, погрешность расчетов по разработанной математической модели составляет не более 5-7%.

В третьей главе разработан способ двухугловой гибки П-образных деталей на угол не более 90° , в котором компенсация пружинения обеспечивается за счет догиба заготовки упругой билинейной или криволинейной планкой и формой пуансона.

На рисунке 4 приведена схема процесса двухугловой гибки с использованием упругих билинейных планок. В начале процесса

наклонный участок планки 5 находится в выпрямленном состоянии за счет воздействия выталкивателя 3. При движении пуансона 4 вниз выталкиватель 3 опускается, начинается процесс гибки заготовки 2. По достижению выталкивателем 3 крайнего нижнего положения наклонный участок планки 5 освобождается, что приводит к изгибу планки на угол $\alpha_{пл}$. Как следствие планки 5 догибают вертикальные полки детали 6 и прижимают их к пуансону 4, выполненному с поднутрением. Таким образом, создается дополнительная деформация полок на детали 6, компенсирующая упругое пружинение.

Для разработанного способа получены уравнения, позволяющие определить геометрические размеры упругой планки, такие как угол загиба, радиус, толщина. Угол наклона одного из прямолинейных участков планки $\alpha_{пл}$ должен включать в себя угол пружинения детали $\Delta\alpha$, который рассчитывается по формуле (14), а также дополнительный угол $\alpha_{доп}$, который необходим для небольшого перегиба заготовки с целью компенсации вариации свойств заготовки и параметров процесса:

$$\alpha_{пл} = \Delta\alpha + \alpha_{доп} \quad (12)$$

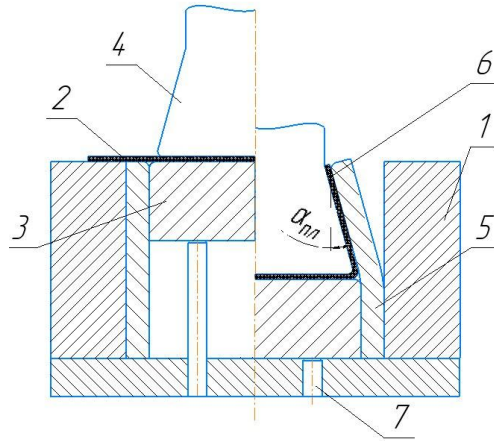


Рисунок 4 – Схема двухугловой гибки с использованием упругих билинейных планок (слева начало процесса, справа окончание): 1 – матрица, 2 – заготовка, 3 – выталкиватель, 4 – пуансон, 5 – упругие планки, 6 – деталь, 7 – шпильки

В расчетах $\alpha_{\text{доп}}$ следует принимать равным величине допуска на угловой размер детали или определять по результатам конечно-элементного моделирования процесса гибки.

Принимая, что упругий момент изгиба материала планки равен моменту пластического сопротивления материала заготовки, а также что распределение упругих деформаций по толщине планки подчиняется линейному закону, получена формула для расчета толщины упругой планки:

$$S_{\text{пл}} = 2,58 \sqrt{\frac{M_{\text{и}}}{\sigma_{0,2\text{пл}} B_{\text{пл}}}}, \quad (13)$$

где $M_{\text{и}}$ – изгибающий момент, $\sigma_{0,2\text{пл}}$ – предел текучести материала планки, $B_{\text{пл}}$ – ширина планки.

Радиус сопряжения $R_{\text{пл}}$ двух прямолинейных участков планки определен, исходя из предельной величины упругой деформации материала планки:

$$R_{\text{пл}} = \frac{S_{\text{пл}}}{2(e^{0,9 \frac{\sigma_{0,2\text{пл}}}{E_{\text{пл}}}} - 1)}, \quad (14)$$

где $E_{\text{пл}}$ – модуль упругости материала планки.

Высоту прямолинейного участка планки, наклоненного под углом $\alpha_{\text{пл}}$ к оси штампа, рекомендуется назначать равным высоте полки детали $h_{\text{пол}}$. В этом случае, высота упругой планки складывается из суммы высоты $h_{\text{пол}}$ полки детали и высоты выталкивателя $h_{\text{выт}}$:

$$h_{\text{пл}} = h_{\text{пол}} + h_{\text{выт}}. \quad (15)$$

При гибке П-образных деталей с длинными полками с целью уменьшения величины рабочего хода, если к прямолинейности полок не предъявляется высоких требований, возможно уменьшение длины наклонного участка планки до половины высоты полки детали.

Штамповая оснастка, реализующая способ с использованием билинейной планки, применима для изготовления конкретной детали. В случае необходимости изготовления подобной детали другой толщины или из другого материала, или при значительной вариации свойств заготовок потребуется изготовление новых планок. Это значительно ограничивает возможности предложенного способа двухугловой гибки в штампе с билинейными планками. Устранить данный недостаток можно при использовании штампа с упругим прижимом, выполненным в виде упругой планки, состоящей из двух участков, один из которых криволинейный с радиусом $R_{\text{пл}}$, а второй – прямолинейный (рисунок 5).

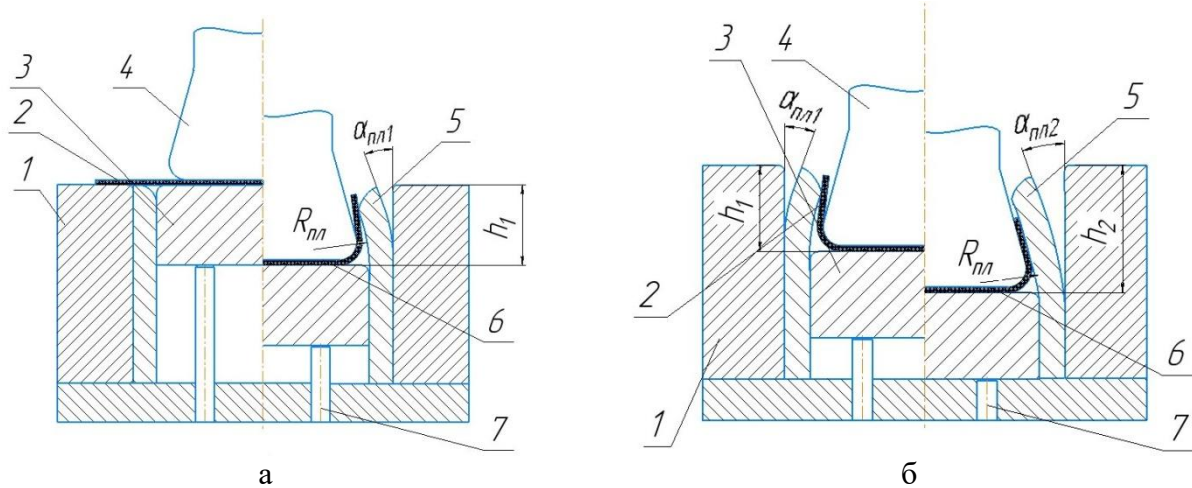


Рисунок 5 – Схема двухугловой гибки с упругими криволинейными планками (а – слева начало процесса, справа середина процесса, б – слева середина процесса, справа окончание процесса): 1 – матрица, 2 – заготовка, 3 – выталкиватель, 4 – пуансон, 5 – упругие планки, 6 – деталь, 7 – шпильки

В начале процесса криволинейный участок планки 5 находится в выпрямленном состоянии за счет воздействия выталкивателя 3. При движении пуансона 4 вниз выталкиватель 3 опускается, при этом освобожденный участок планки возвращается в исходное состояние и изгибается на радиус $R_{пл}$, создавая изгибающий момент и прижимая вертикальные полки детали 6 к пуансону 4. Величина догиба полки детали 6 определяется углом наклона планки, который увеличивается по мере перемещения пуансона 4 вглубь матрицы, характеризуемого величиной h . Максимальный угол наклона планок достигается в крайнем нижнем положении выталкивателя. Планки 5, перемещаясь в направлении перпендикулярном оси штампа, давят на полки детали, загибая их в том же направлении до момента пока угол догиба не достигнет требуемого значения.

Криволинейные планки в отличие от билинейных позволяют регулировать угол догиба $\alpha_{пл}$ только за счет изменения хода пуансона, не переделывая штамповую оснастку. Так в случае недогиба полки необходимо увеличить величину перемещения h , а в случае перегиба – уменьшить. Отладив процесс, его в дальнейшем проводят многократно без доводочных операций.

Для расчета угла загиба, толщины и радиуса упругой криволинейной планки используются выражения (12)-(14) для билинейной планки (радиус криволинейной планки соответствует радиусу сопряжения прямолинейных участков билинейной планки).

Из геометрических соотношений определена длина рабочей части $l_{a'b}$ и высота $h_{пл}$ криволинейной планки:

$$l_{a'b} = R_{пл} \sin 2\alpha_{пл}, \quad (16)$$

$$h_{пл} = h_{выт} + l_{a'b} + r_{пл} + r_{п} + s_0, \quad (17)$$

где $r_{пл}$ – радиус скругления кромки планки, $r_{п}$ – радиус пуансона.

Таким образом, высота упругой криволинейной планки определяется требуемым углом догиба заготовки $\alpha_{пл}$. С другой стороны, для создания возможности регулирования угла догиба заготовки криволинейной планкой рекомендуется назначать длину ее рабочей части равной $l_{a'b} = (5 - 10)S_0$. В этом случае максимальный угол догиба заготовки $\alpha_{пл}^{max}$ – угол наклона криволинейной планки в крайнем максимальном нижнем положении выталкивателя будет равен:

$$\alpha_{пл}^{max} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{(5-10)S_0}{R_{пл}}, \quad (18)$$

а ход пуансона h , при котором достигается промежуточный угол догиба $\alpha_{пл}$:

$$h = R_{пл} \sin 2\alpha_{пл} + r_{пл} + r_{п}. \quad (19)$$

При изготовлении П-образных деталей в условиях крупносерийного и массового производства, а также при большой высоте полок и/или предъявлении высоких требований к их прямолинейности, рекомендуется использовать упругие билинейные планки. В случае единичного и мелкосерийного производства, большой номенклатуры толщин и материалов П-образных деталей, а также при значительной вариации свойств заготовок, рекомендуется использовать упругие криволинейные планки.

Проведен расчет геометрических размеров упругой планки для гибки заготовок различной толщины при разных материалах планки и заготовки. Установлено, что с увеличением предела прочности материала заготовки по отношению к пределу текучести планки ее относительная толщина увеличивается (рисунок 6). Относительный радиус упругой планки уменьшается с ростом предельного значения упругой деформации, что позволяет сократить высоту упругой криволинейной планки (рисунок 7). С учетом приведенных расчетов радиуса и толщины упругой планки – оптимальными материалами для ее изготовления являются инструментальные стали (У7, У8, У10, 6ХВГ).

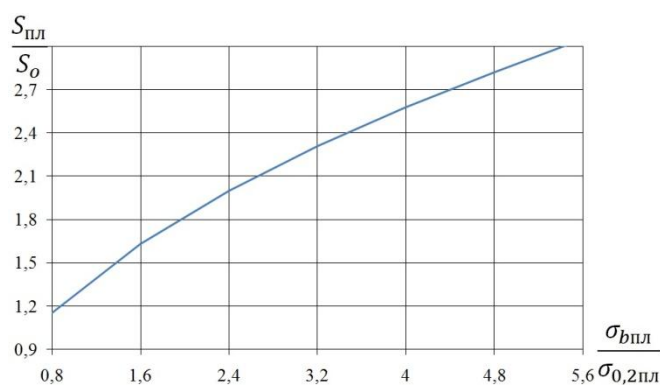


Рисунок 6 – Изменение относительной толщины упругой планки от отношения предела прочности заготовки к пределу текучести материала планки

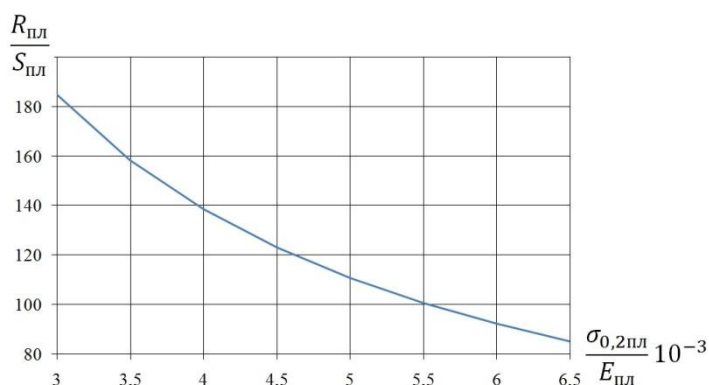


Рисунок 7 – Изменение относительного радиуса упругой планки от отношения предела текучести к модулю упругости материала планки

Разработана методика проектирования технологического процесса двухугловой гибки в штампе с упругими элементами (рисунок 8). На основе методики разработаны руководяще-технические материалы, которые внедрены в практику ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

В четвертой главе проведена конечно-элементная и экспериментальная проверка способа двухугловой гибки с упругим прижимом заготовки.

Разработана компьютерная модель процесса двухугловой гибки с упругим прижимом заготовки в программном комплексе DEFORM-2D для анализа напряженно-деформированного состояния упругой билинейной и криволинейной планок. Максимальное значение интенсивности напряжений наблюдается в месте радиусного сопряжения двух прямолинейных участков упругой билинейной планки и вблизи прямолинейного участка криволинейной планки (рисунок 9). Максимальное значение интенсивности напряжений не превышает предела текучести материала планки. При этом в криволинейной планке возникают меньшие напряжения, чем в билинейной.

Проведены экспериментальные исследования (рисунки 10-11) и подтверждена возможность компенсации пружинения при двухугловой гибке без принципиального изменения схемы штамповки за счет поднутрения на пуансоне и установке различных видов упругих планок. Приведенное сравнение углов детали, изготовленной с использованием упругой планки и без нее, показывает, что при использовании упругой планки происходит компенсация упругого пружинения и требуемый угол получается за одно действие без использования дополнительных операций (рисунок 12).

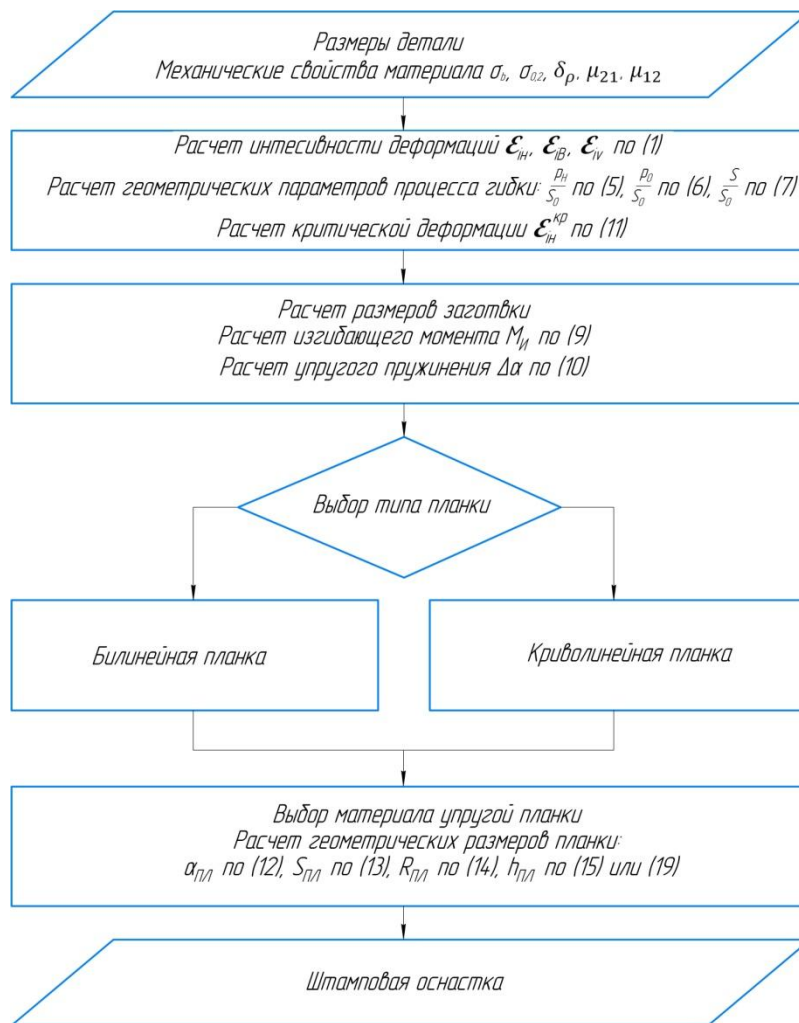


Рисунок 8 – Основные этапы проектирования штамповой оснастки для двухугловой гибки с упругими планками

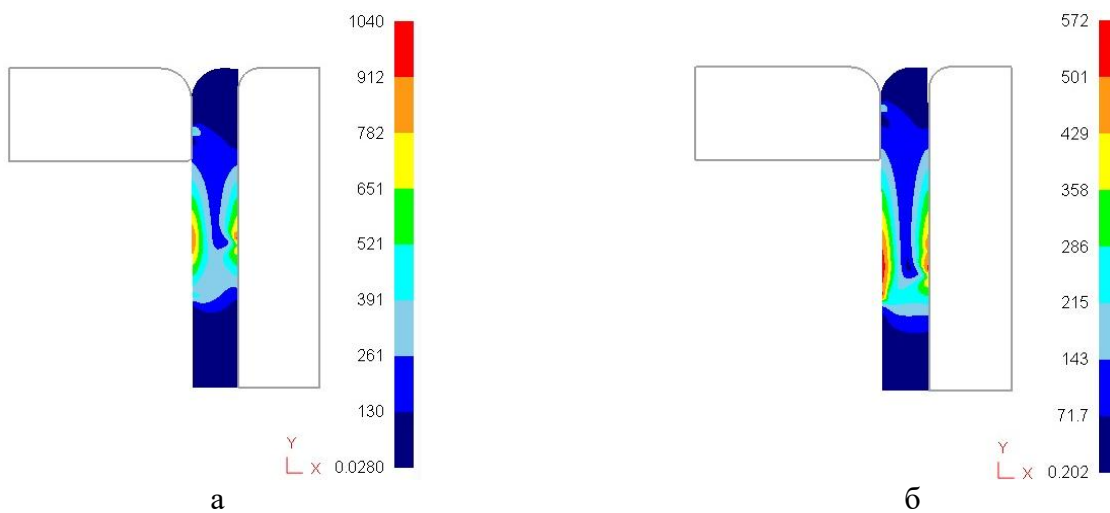


Рисунок 9 – Поля интенсивности напряжений (МПа) при выпрямлении билинейной (а) и криволинейной (б) планки



Рисунок 10 – Общий вид испытательного стенда: 1 – испытательная машина TIRAtest 28300; 2 – система бесконтактного измерения деформаций VIC-3D; 3 – штамповая оснастка

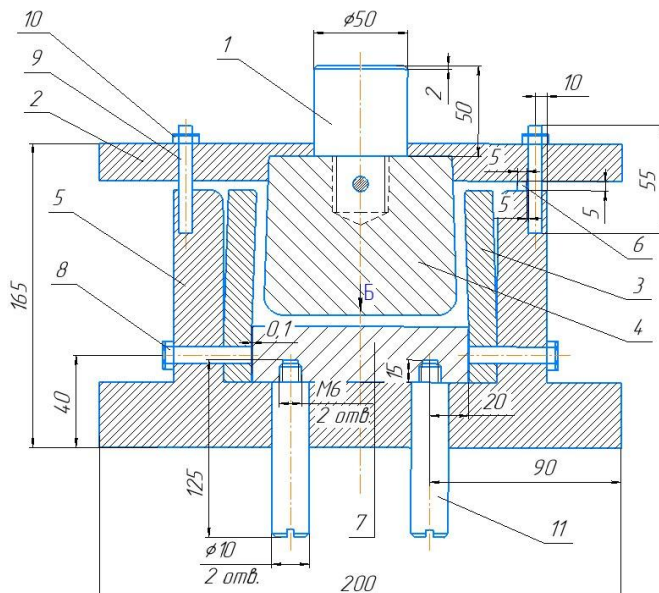


Рисунок 11 – Схема штамповой оснастки: 1 – хвостовик; 2 – верхняя плита; 3 – упругие планки; 4 – пуансон; 5 – матрица и нижняя плита; 6 – упор; 7 – выталкиватель; 8 – болт; 9 – направляющие; 10 – гайка; 11 – выталкиватель

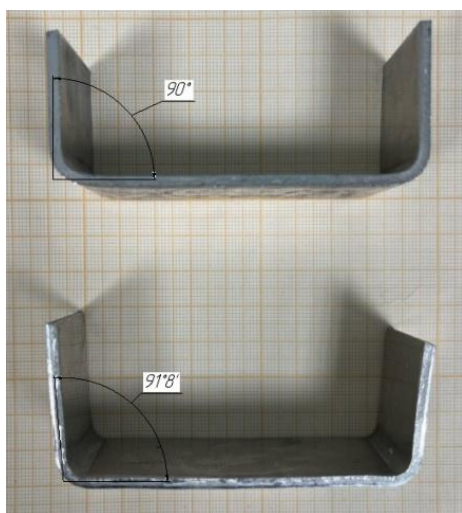


Рисунок 12 – Детали из алюминиевого сплава 8011А, согнутые в штампе с (сверху) и без (снизу) упругих планок

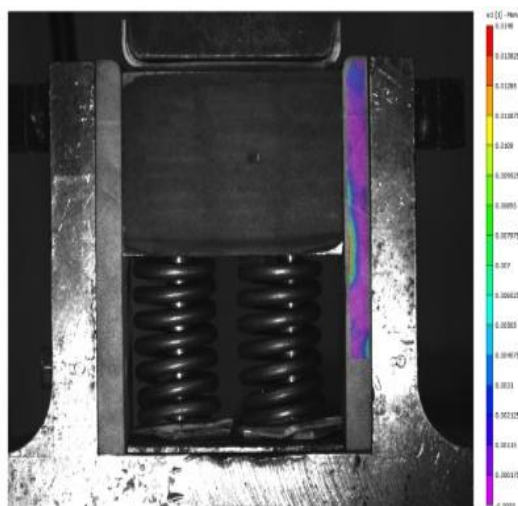


Рисунок 13 – Тангенциальная деформация планки при ее выпрямлении выталкивателем

Также экспериментально бесконтактным методом (рисунок 10) подтверждено, что при выпрямлении упругой планки выталкивателем на ее поверхности в зоне радиусного сопряжения прямолинейных участков возникают только упругие деформации (рисунок 13). Максимальное значение деформаций равно 0,42% и не превышает предельно допустимой упругой деформации материала планки для стали У10 (0,46%).

В заключении приводятся основные результаты диссертации и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана и экспериментально верифицирована аналитическая модель гибки листовых материалов, учитывающая утонение, пластическую анизотропию свойств и деформационное упрочнение заготовки и позволяющая проводить расчеты напряженно-деформированного состояния заготовки, предельных деформаций, силовых параметров процесса, упругого пружинения при разгрузке.

2. Выявлены закономерности влияния упрочнения и анизотропии заготовки на геометрические параметры при гибке. Увеличение показателя упрочнения приводит к смещению радиусов нейтральных поверхностей по напряжениям и итоговой деформации к внутренней (вогнутой) поверхности, что приводит к более интенсивному уменьшению толщины заготовки. Установлено, что пластическая анизотропия не оказывает влияния на геометрические параметры процесса гибки - положение нейтральных поверхностей по напряжениям и итоговой деформации, а также утонение заготовки.

3. Угол упругого пружинения уменьшается при увеличении показателя упрочнения, что связано с увеличением напряжений, вызванных пластическими деформациями, по сравнению с величиной напряжений от упругих деформаций. В зависимости от величины коэффициента Лоде угол пружинения анизотропной заготовки может быть больше или меньше, чем изотропной.

4. Разработан способ двухугловой гибки П-образных деталей, в котором компенсация пружинения обеспечивается за счет догиба заготовки упругой билинейной или криволинейной планкой и формой пуансона. Предложена конструкция универсального штампа для двухугловой гибки со сменными пуансонами с различным поднутрением и упругими планками. Разработанный штамп для двухугловой гибки защищен патентом РФ №153887.

5. Получены уравнения, позволяющие определить геометрические размеры упругой планки, такие как угол загиба, радиус, толщина. Выполнен расчет геометрических размеров упругой планки для гибки заготовок различной толщины при разных материалах планки и заготовки. Установлено, что с увеличением предела прочности материала заготовки по отношению к пределу текучести планки ее относительная толщина увеличивается. Также установлено, что относительный радиус упругой планки уменьшается с ростом предельного значения упругой деформации, что позволяет сократить высоту упругой криволинейной планки. С учетом приведенных расчетов радиуса и толщины упругой планки - оптимальными материалами для ее изготовления являются инструментальные стали (У7, У8, У10, 6ХВГ).

6. Разработана компьютерная модель процесса двухугловой гибки с упругим прижимом заготовки в программном комплексе DEFORM-2D для анализа напряженно-деформированного состояния упругой билинейной и криволинейной планок. Подтверждено, что максимальные значения интенсивности напряжений в планке не превышают предела текучести материала планки.

7. С использованием экспериментального штампа подтверждено, что при выпрямлении упругой планки выталкивателем возникающие деформации не превышает предельно допустимой упругой деформации материала планки.

8. Результатами компьютерного моделирования и экспериментально подтверждена возможность компенсации пружинения заготовок при двухугловой гибке без принципиального изменения схемы штамповки за счет поднутрения на пуансоне и установке различных видов упругих планок.

9. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны руководяще-технические материалы, содержащие рекомендации по реализации разработанного способа гибки, конструкции штамповой оснастки, режимам гибки, техническим требованиям к изделиям. Руководяще-технические материалы внедрены в практику ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Кузин, А.О. Экспериментальное определение радиуса нейтральной поверхности при гибке моментом / А.О. Кузин, Я.А. Ерисов, В.А. Разживин, И.Н. Петров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. - № 1. – С. 5-10.
2. Кузин, А.О. Экспериментальное исследование штампа с упругим элементом, предназначенного для двухугловой гибки / А.О. Кузин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. - № 4. – С. 21-24.
3. Кузин, А.О. Моделирование операции двухугловой гибки в штампе с упругим элементом / А.О. Кузин, И.П. Попов, Е.С. Нестеренко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – № 4. – С. 25-30.
4. Кузин, А.О. Экспериментальное подтверждение теоретических результатов исследования штампа для гибки плоских заготовок с упругим элементом / А.О. Кузин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – №. 7. – С. 18-21.
5. Кузин, А.О. Исследование упругих свойств штамповой оснастки при операции двухугловой гибки в штампе с упругой планкой / А.О. Кузин, И.П. Попов, Е.С. Нестеренко // Заготовительные производства в машиностроении – 2013. – № 4. – С. 20-23.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science

6. Kuzin, A.O. Effect of the Heat-Affected Zone Formed during Laser Cutting on the Bending of an Aluminum Alloy Workpiece / A.O.Kuzin, Y.S. Gorshkov, Y.A. Erisov, I.N. Petrov, S.V. Surudin // Russian Metallurgy (Metally) – 2021. – №. 10. –С. 1304-1308.
7. Kuzin, A.O. 90 degrees two-angle bending method with due to blank's elastic spring back properties / A.O. Kuzin, E.S. Nesterenko // MATEC web of conferences– 2018. – С.01043.
8. Kuzin, A.O. Influence of material structure crystallography on its formability in sheet metal forming processes / A.O. Kuzin, F.V. Grechnikov, S.V. Surudin, Ya.A. Erisov, I.N. Bobrovskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering– 2018. – С.012021.

Патенты

9. Кузин, А.О. Штмп для гибки плоских деталей с упругой планкой / А.О. Кузин, И.П. Попов, Е.С. Нестеренко // Патент на полезную модель RU 153887 U1, 10.08.2015. Заявка № 2015114028/02 от 15.04.2015.

В других изданиях:

10. Кузин, А.О. Экспериментальное определение радиуса кривизны нейтральной поверхности при гибке / А.О. Кузин, В.А. Разживин, И.Н. Петров // В книге: XVI Королёвские чтения. Сборник материалов международной молодёжной научной конференции, посвящённой 60-летию полёта в космос Ю.А. Гагарина. В 3-х томах - Самара - 2021. - С. 60-61.
11. Кузин, А.О. Развитие и оптимизация способа двухугловой гибки в штампе с упругими планками / А.О. Кузин, В.Н. Абрамов // В сборнике: XLVI Гагаринские чтения. Сборник трудов Международной молодежной научной конференции. Секция «Механика и моделирование материалов и технологий» - Москва - 2020. С. 64-66.
12. Кузин, А.О. Получение кронштейнов, стрингеров и шпангоутов методом двухугловой гибки в штампе с упругим элементом / Кузин А.О. Всероссийская конференция, Сборник трудов «Молодежь. Техника, Космос», тезис на конференции в г. Санкт-Петербург «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова» - Санкт-Петербург, 2017 – С. 135-137.

13. Кузин, А.О. Экспериментальное подтверждение результатов моделирования штампа для двухугловой гибки с упругим элементом / Кузин А.О. Международная конференция, Сборник трудов «Гагаринские чтения» - Москва, 2017 – С. 343.

14. Кузин, А.О. Напряжения и деформации, возникающие при гибке с упругим элементом / Кузин А.О. // Материалы конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации Российский фонд фундаментальных исследований Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). – Казань, 2015 – С. 245-249.