

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева»
(Самарский университет)

На правах рукописи

КУЗИН АЛЕКСАНДР ОЛЕГОВИЧ

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

2.5.7. – Технологии и машины обработки давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., доцент Ерисов Я.А.

Самара – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ	13
ДВУХУГЛОВОЙ ГИБКИ	13
1.1 Детали, изготавливаемые двухугловой гибкой: классификатор, материалы, требования к точности	13
1.2 Подходы к теоретическому описанию процесса гибки	19
1.2.1 Механические особенности процесса гибки.....	19
1.2.2 Современное состояние теории гибки.....	23
1.2.3 Упругое пружинение при гибке	26
1.4 Способы снижения пружинения при двухугловой гибке.....	29
1.5 Использование упругих элементов в конструкции штамповой оснастки	35
1.6 Выводы по главе и основные задачи исследования	40
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ГИБКИ МОМЕНТОМ С УЧЁТОМ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ ЗАГОТОВКИ, ЕЁ УПРОЧНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ.....	43
2.1 Постановка задачи, принимаемые допущения	43
2.2 Модель анизотропного упрочняющегося материала	44
2.3 Напряженно-деформированное состояние при круговом изгибе листа	46
2.4 Предельные деформационные возможности материала при гибке анизотропной заготовки	54
2.5 Упругое пружинение при гибке	56
2.6 Анализ процесса гибки с учетом упрочнения, анизотропии и утонения заготовки	59
2.6.1 Взаимосвязь механических характеристик, анизотропии и предельных деформаций	59
2.6.2 Пример расчета процесса гибки заготовки из алюминиевого сплава 8011А.....	62
2.6.3 Влияние упрочнения и анизотропии на процесс гибки	67
2.7 Экспериментальное исследование деформированного состояния при гибке	71

2.8 Выводы по главе.....	76
3 РАЗРАБОТКА СПОСОБА ДВУХУГЛОВОЙ ГИБКИ С УПРУГИМ ПРИЖИМОМ ЗАГОТОВКИ.....	79
3.1 Способ двухугловой гибки с упругими билинейными планками	79
3.1.1 Описание способа	79
3.1.2 Определение размеров планки	80
3.2 Способ двухугловой гибки с упругими криволинейными планками.....	85
3.2.1 Описание способа	85
3.2.2 Определение размеров планки	88
3.3 Разновидности разработанных способов для гибки деталей другой формы	90
3.4 Анализ геометрических размеров упругих планок	92
3.5 Методика разработки технологического процесса двухугловой гибки в штампе с упругими прижимами	95
3.6 Выводы по главе.....	98
4 КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СПОСОБА ДВУХУГЛОВОЙ ГИБКИ С УПРУГИМ ПРИЖИМОМ ЗАГОТОВКИ	100
4.1 Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния упругих планок в процессе гибки	100
4.1.1 Разработка компьютерной модели двухугловой гибки с упругим прижимом заготовки.....	100
4.1.2 Напряженно-деформированное состояние при гибке с использованием билинейной планки	104
4.1.3 Напряженно-деформированное состояние при гибке с использованием криволинейной планки	111
4.2 Экспериментальная проверка способа двухугловой гибки с упругим прижимом заготовки.....	119
4.2.1 Материалы, штамповая оснастка, оборудование	120
4.2.2 Методика проведения эксперимента	121
4.2.3 Результаты эксперимента.....	122
4.3 Выводы по главе.....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	128
Приложение А.....	137

ВВЕДЕНИЕ

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 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 двухугловой 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 использованных источников и приложения. Работа выполнена на 137 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок, 2 таблицы и 1 приложение. Список использованных источников содержит 89 наименований.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ДВУХУГЛОВОЙ ГИБКИ

1.1 Детали, изготавливаемые двухугловой гибкой: классификатор, материалы, требования к точности

Детали, полученные двухугловой гибкой, входят в конструкцию изделий различного назначения и составляют в машиностроении по номенклатуре и объему один из наиболее распространенных классов. Это стрингеры, шпангоуты, металлические корпуса, уголки, кронштейны, скобы и т.д. Наибольшее применение они находят в самолетостроении, ракетостроении, судостроении, нефтехимическом и сельскохозяйственном машиностроении и других областях. Габариты деталей рассматриваемого класса изменяются в широком диапазоне - от нескольких сантиметров до многометровой величины. Диапазон толщин изгибаемых заготовок достаточно велик, однако, преобладают заготовки толщиной от 0,2 до 6 мм.

Рассматриваемые детали относятся к деталям, поперечный контур которых образован сочетанием прямолинейных участков, одинаковой или различной длины, соединенных радиусными сопряжениями (рисунок 1.1). Разновидность форм рассматриваемых деталей характеризуется различным сочетанием прямолинейных участков контура и разной величиной углов между ними (рисунок 1.2). Так можно классифицировать П-, S-, V-образные детали. Последние тоже можно изготавливать двухугловой гибкой - за счет симметрии детали вначале получить П-образный профиль, который затем разрезать пополам и получить две искомые детали [1].

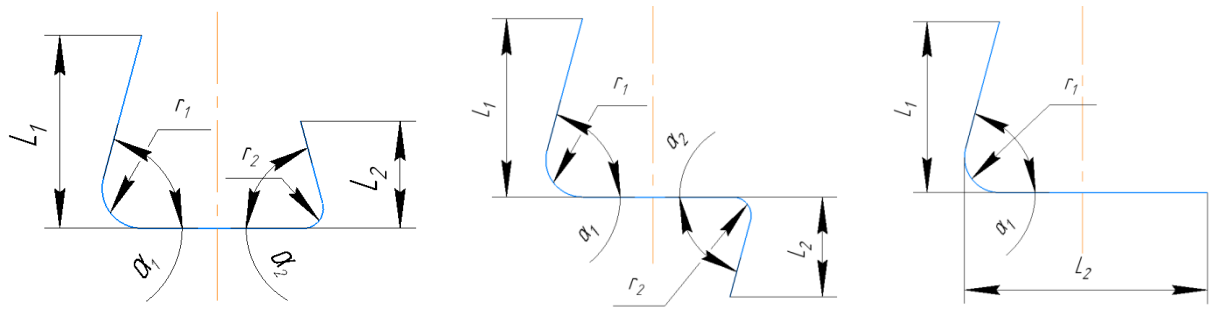


Рисунок 1.1 – Схема деталей, изготавливаемых двухугловой гибкой

		П-образные				
		$\alpha_{1,2} = 90^\circ$	$\alpha_{1,2} < 90^\circ$		$\alpha_{1,2} > 90^\circ$	
			$\alpha_1 = \alpha_2$	$\alpha_1 \neq \alpha_2$	$\alpha_1 = \alpha_2$	$\alpha_1 \neq \alpha_2$
$r_1 = r_2$	$L_1 = L_2$					
	$L_1 \neq L_2$					
$r_1 \neq r_2$	$L_1 \neq L_2$					

а

S-образные				V-образные					
		$\alpha_{1,2} = 90^\circ$	$\alpha_1 = \alpha_2 < 90^\circ$	$\alpha_1 \neq \alpha_2 < 90^\circ$			$\alpha = 90^\circ$	$\alpha < 90^\circ$	$\alpha < 90^\circ$
$r_1 = r_2$	$L_1 = L_2$				$L_1 = L_2$				
	$L_1 \neq L_2$					$L_1 \neq L_2$			
$r_1 \neq r_2$ $L_1 \neq L_2$									

б

в

Рисунок 1.2 - Номенклатура деталей для двухугловой гибки:

П-образные детали (а); S-образные детали (б); V-образные детали (в)

Основным геометрическим параметром, характеризующим форму деталей для двухугловой гибки, является угол загиба, который задается с определенной точностью и является сопрягаемым параметром при установке деталей в узлах и агрегатах. В связи с этим, упругое пружинение, изменяющее уголгиба после проведения гибки, является недопустимым явлением. Криволинейный участок контура при вершине угла в большинстве случаев не является сопрягаемым параметром. Его величина назначается из условий необходимой жесткости деталей и возможности формообразования при данных пластических свойствах деформируемого металла.

Эксплуатационные свойства готовых деталей, полученных штамповкой, в значительной степени определяются характеристиками исходной листовой заготовки, полученной прокаткой. При выборе характеристик листовой заготовки традиционно руководствуются требованиями к свойствам детали и способностью заготовки к формоизменению в операциях листовой штамповки.

В конструкциях изделий различного назначения применяется широкая номенклатура П-образных деталей из различных материалов, которые можно разделить на 2 группы по соотношению механических свойств - предела текучести $\sigma_{0,2}$, предела прочности σ_b и модуля упругости E : средне- и высокопрочные (рисунок 1.3).

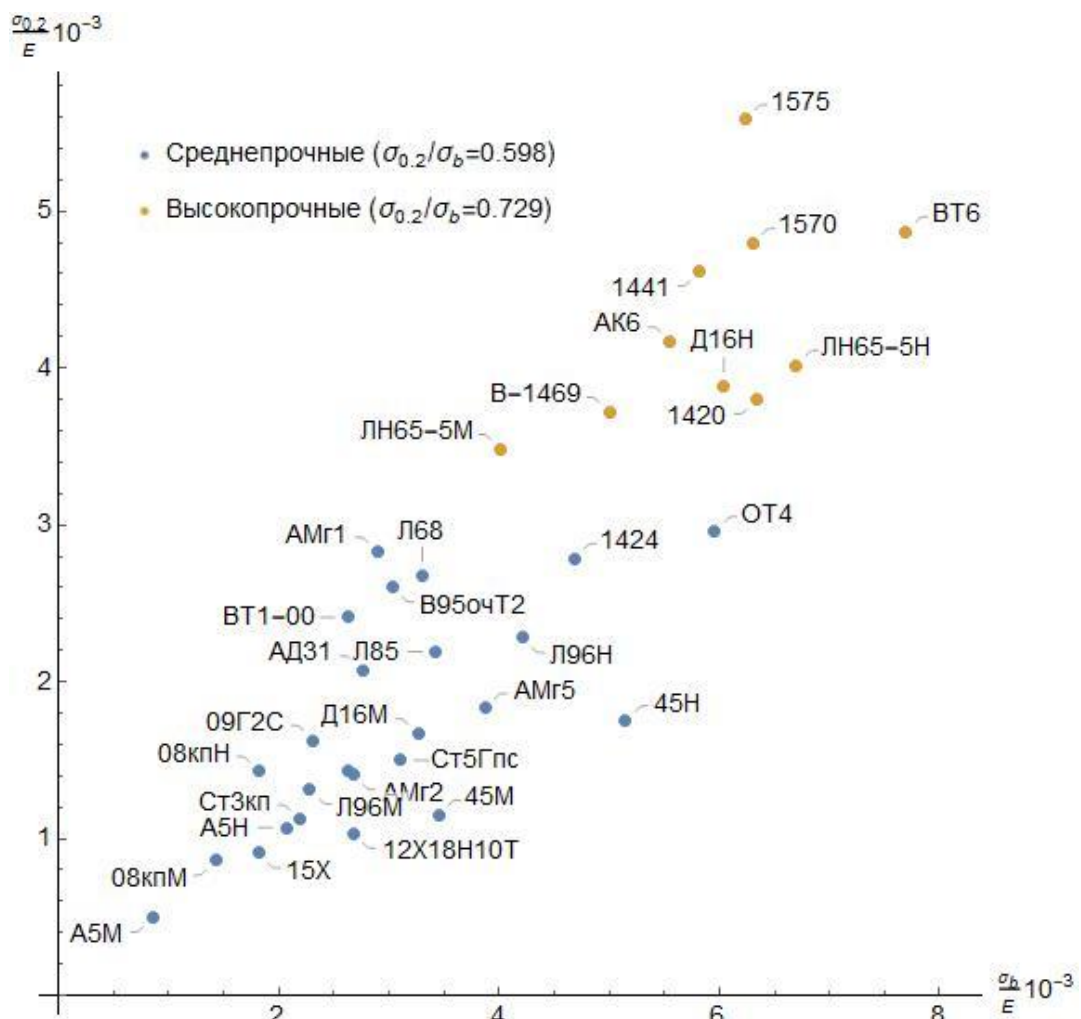


Рисунок 1.3 - Распределение материалов заготовок в зависимости от их предела текучести и модуля упругости (на основании данных из [2-4])

Многие листовые материалы, особенно, алюминиевые сплавы, отличаются анизотропией пластических свойств (рисунок 1.4). Работы [5-7, 33] свидетельствуют о том, что влияние анизотропии сказывается на величине напряжений и деформаций, а также на характере их распределения при изгибе листов. Это говорит о необходимости учета пластической анизотропии свойств при гибке П-образных деталей.

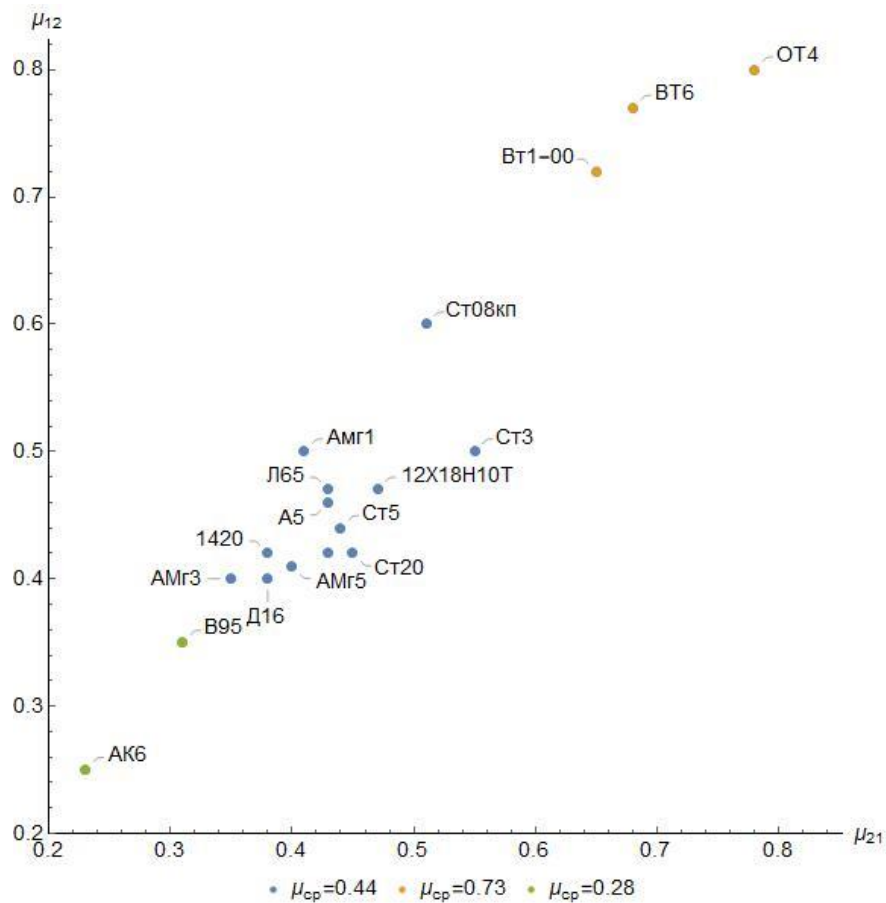


Рисунок 1.4 - Распределение материалов заготовок в зависимости от показателей пластической анизотропии вдоль μ_{21} и поперек μ_{12} направления прокатки (на основании данных из [8])

Наиболее широко, в частности, в машиностроении и строительстве используются П-образные детали, изготовленные из низкоуглеродистых сталей высокой пластичности с содержанием углерода 0,05-0,4%.

В авиационной и ракетно-космической промышленности для производства таких П-образных деталей как шпангоуты и стрингеры широко применяется листовой прокат из алюминия и алюминиевых сплавов, что объясняется высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью таких сплавов.

В последние годы наряду с традиционными алюминиевыми сплавами (АМг5, АМг6, Д16, В95 и др.) наблюдается внедрение алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности (1441, В-1469 и др.). Из-за высокого модуля упругости и ярко выраженной анизотропии (рисунок 1.4) проблема устранения пружинения при гибке П-образных деталей из данных сплавов стоит наиболее остро [4].

Еще одной важной группой материалов являются латуни, П-образные детали из которых широко применяются в электротехнической, электронной, приборостроительной и других отраслях промышленности.

На точность штампованных деталей, получаемых гибкой, влияет ряд факторов, основными из которых являются: марка материала и его состояние (упругие и пластические свойства); форма и геометрические размеры деталей (толщина, линейные размеры); структура технологического процесса (количество и последовательность операций); тип штампа и точность его изготовления, стойкость рабочих частей штампа; конструкция и состояние пресса; условия работы и погрешности, вызываемые неправильной установкой штампа, неаккуратной укладкой заготовки при фиксации, неодинаковой силой удара и др.

При гибке деталей их неточность складывается из двух видов погрешностей [9]: погрешности формы и размерные погрешности. Погрешности формы зависят от марки материала и его толщины, относительного радиусагиба, величины зазора и от усилия пресса. Самым распространенным дефектом формы является отклонение угла загиба от заданного впоследствии пружинения. Размерные погрешности зависят от типа штампа (с прижимом или без него) и от точности изготовления его элементов, от точности укладывания заготовки и ее устойчивости в процессе гибки. Они выражаются в отклонении по длине детали и по высоте ее полок,

в отклонениях расстояния между отверстиями или расстояния от полки до оси отверстия и др. Погрешности, связанные с изготовлением рабочих частей штампа и их износом, ограничиваются заданием необходимых допусков. Допуски на рабочие размеры пуансонов и матриц двухугловых штампов для получения деталей типа скобы устанавливаются в зависимости от того, какой размер изделия по техническим условиям требуется выдержать точно — наружный или внутренний.

В данной работе основное внимание уделено устранению пружинения при гибке П-образных деталей.

1.2 Подходы к теоретическому описанию процесса гибки

1.2.1 Механические особенности процесса гибки

Гибка - это формообразующая операция, при которой изменяется кривизна в одном или нескольких участках заготовки. Изменение кривизны может происходить только при переменных деформациях по толщине. Эти переменные деформации вызваны переменными напряжениями по толщине. Гибка производится под действием силы, момента или одновременно силой и моментом. Схема процесса гибки показана на рисунке 1.5.

Вблизи наружной (выпуклой) поверхности размеры материальной частицы увеличиваются в тангенциальном направлении и уменьшаются в радиальном, вблизи внутренней (вогнутой) поверхности размеры частицы уменьшаются в тангенциальном направлении и увеличиваются в радиальном. То есть изгибаемый лист разделен по толщине на две зоны: зону, где на данной стадии процесса гибо материальные волокна удлиняются в тангенциальном направлении; и зону, где волокна укорачиваются в тангенциальном направлении.

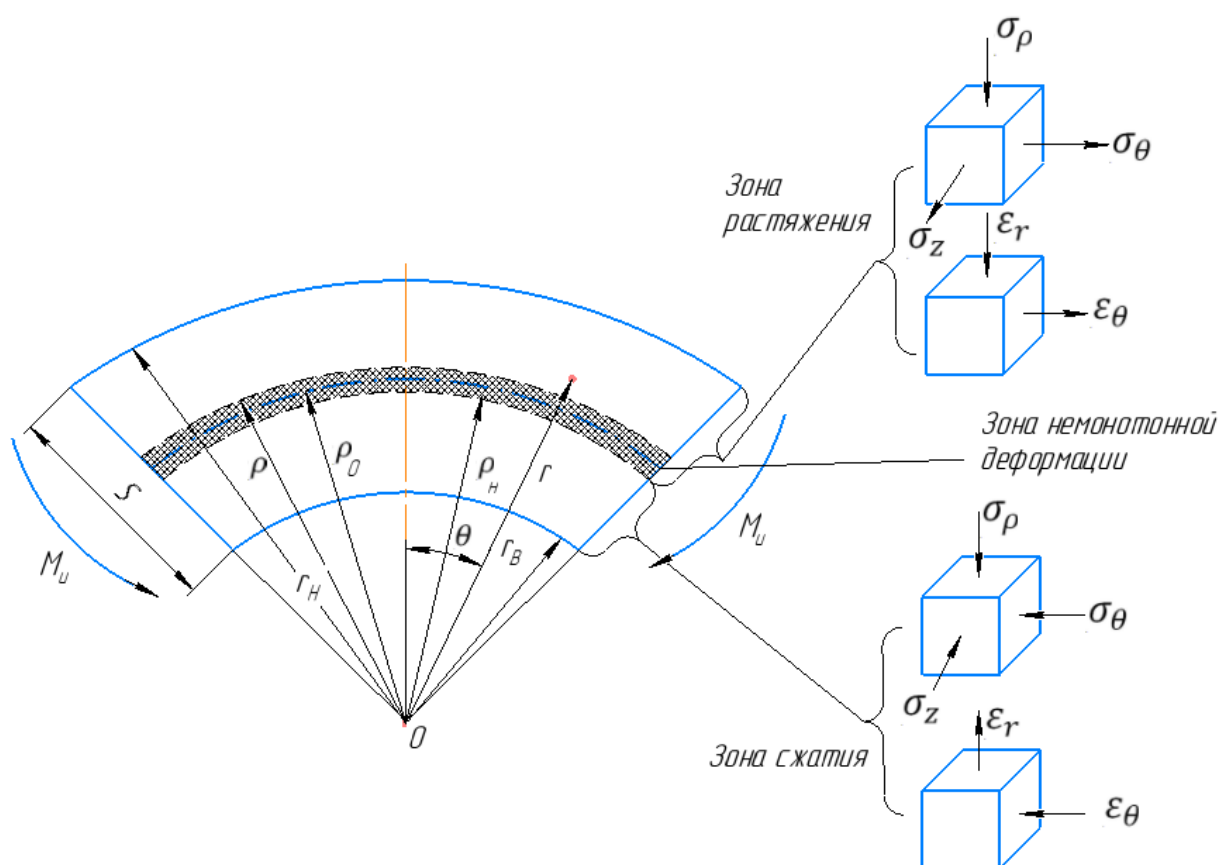


Рисунок 1.5 - Схема напряженного и деформированного состояния при круговом изгибе с учётом зоны немонотонной деформации

Радиус границы этих двух зон называется радиусом нейтрального слоя по напряжениям (скорости деформации), обозначим его ρ_n . При переходе из одной зоны в другую изменяются знаки главных деформаций и тангенциальных напряжений.

При анализе процессов изгиба металлических листов в холодном состоянии необходимо учитывать деформационное упрочнение, то есть переменность значения интенсивности напряжений σ_i по толщине. Это вызвано немонотонностью процесса деформации по толщине.

Монотонно деформация протекает при $r_B \leq r \leq \rho_n$, где материальные частицы на всех предшествующих стадиях процесса изгиба укорачивались в тангенциальном направлении. Монотонно протекает деформация также при $\rho \leq r \leq r_n$, где материальные частицы на всех предшествующих стадиях

изгиба удлинялись в тангенциальном направлении. При $\rho_H < r < \rho$ деформацию нельзя считать монотонной, поскольку материальные частицы, расположенные в данный момент на этих радиусах в начале процесса изгиба укорачивались в тангенциальном направлении, а затем стали удлиняться.

Таким образом, в зоне немонотонной деформации $\rho_H < r < \rho$ можно выделить радиус $r = \rho_0$ нейтрального слоя по итоговой деформации изменения длины материального волокна, то есть такого слоя, размеры материальных частиц которого в данный момент равны своим исходным значениям. Частицы в этом слое в самом начале процесса изгиба укорачивались в тангенциальном направлении и удлинялись в радиальном, а затем уже начали удлиняться в тангенциальном направлении и укорачиваться в радиальном и к данному моменту снова приняли ту форму, которую имели до деформации.

Значения радиусов нейтрального слоя по напряжениям ρ_H и итоговой деформации ρ_0 необходимы для расчёта напряженно-деформированного состояния, силовых условий и предельных деформационных возможностей заготовки в процессе изгиба, а также величины упругого пружинения.

Сложность расчёта значений ρ_H и ρ_0 заключается в необходимости учёта изменения толщины изгибаемого листа (как показывает практика, лист при изгибе обычно несколько утоняется), деформационного упрочнения и анизотропии пластических свойств заготовки.

При гибке узких полос (шириной менее 200 мм) происходит сильное искажение поперечного сечения, заключающееся в уменьшении толщины в месте изгиба, уширении внутри угла с образованием поперечной кривизны и сужении с наружной стороны (рисунок 1.6, а). По мере увеличения ширины изгибаемой заготовки поперечная деформация постепенно уменьшается и становится весьма малой в результате значительного сопротивления, оказываемого большой шириной заготовки. При гибке широких полос и листов (шириной более 200 мм) также происходит утонение материала, но почти без искажения поперечного сечения (рисунок 1.6, б). Лишь по краям

широких полос происходит деформация, аналогичная поперечной деформации узких полос [10].

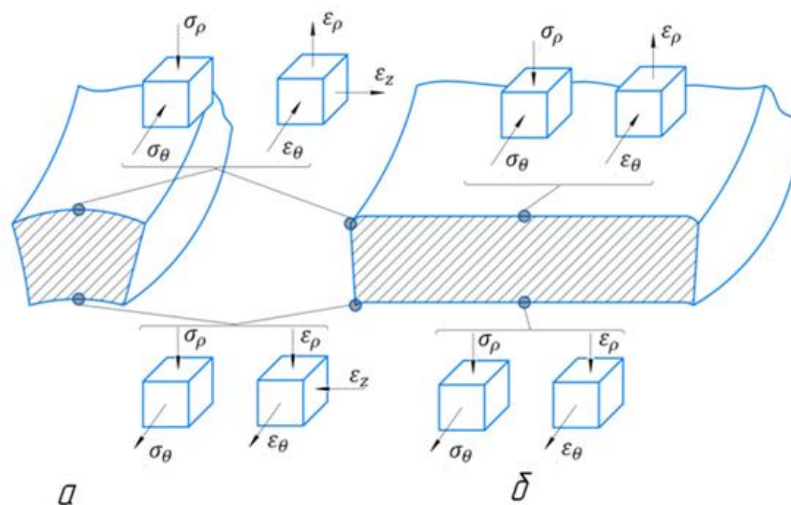


Рисунок 1.6 – Схемы напряжённо-деформированного состояния при изгибе узкой (а) и широкой (б) заготовки: σ – напряжения, ϵ – деформации

На рисунке 1.7 приведена последовательность процесса двухугловой гибки. Этот случай гибки требует обязательного применения прижима. Слева показана последовательность гибки при недостаточной силе прижима, в результате чего деталь получается некачественной - недоштампованной. В центре показана последовательность гибки при достаточно большой силе прижима, обеспечивающей полный загиб полка при плоском дне. Справа приведен более надежный способ гибки деталей средней толщины с глухим калибрующим ударом в нижнем положении. Однако, он требует применения заготовок с небольшим отклонением по толщине и запаса мощности прессы, во избежание заклинивания в нижней мертвой точке.

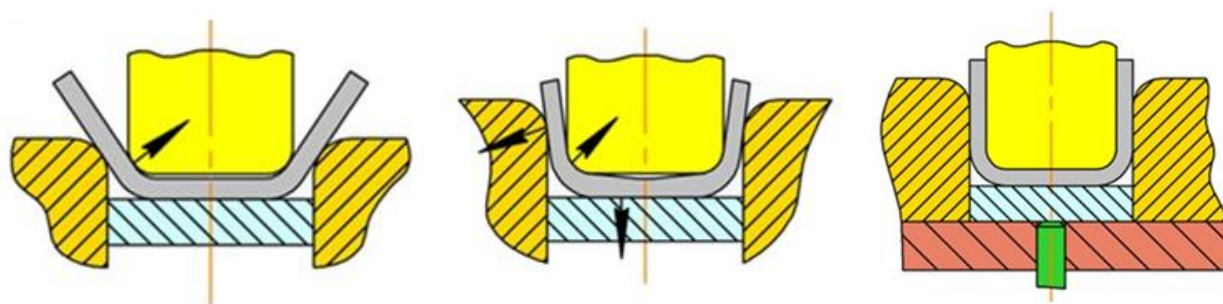


Рисунок 1.7 – Последовательность процесса двухугловой гибки

Гибка без прижима применяется лишь для деталей невысокой точности (7-й класс), так как допускает смещение заготовки при гибке. Гибка с прижимом применяется для деталей повышенной точности (5-й класс), так как не допускает смещения заготовки в процессе гибки.

1.2.2 Современное состояние теории гибки

В теории упругости и ее приложениях изгиб рассматривают, исходя из концепции малых перемещений [11, 12]. Внешние силы задают как не зависящие от перемещений изгиба, аналогично определяют напряжения и деформации. В теории гибких стержней, которая используется, в частности, для расчета пластинчатых пружин, учитывают возможное изменение направления силы, вызванное перемещениями изгиба. При этом исходные данные задачи могут содержать параметры нагружения либо граничные перемещения. Последний вариант является характерным для изгиба, когда ограничивают перемещения материала размерами штампа, а прочие параметры процесса рассчитывают в последовательности: деформации, напряжения, внешние силы.

Прикладная теория пластичности рассматривает изгиб с позиций гипотезы плоских сечений, что предопределяет идеализацию расчетных схем. В частности, решена задача чистого изгиба листа на малый радиус с использованием соотношений Прандтля-Рейсса для пластического течения [13]. Получены формулы напряжений изгибающего момента, утонения

материала.

В теории листовой штамповки [14] также не отступают от гипотезы плоских сечений. Предлагают эмпирические соотношения, апробированные практикой, либо усложняют расчетные схемы, как, например, в [15], где учитывается действие продольных сил, растягивающих листовой материал в процессе перетягивания через кромку матрицы.

Наряду с утонением листа при гибке изменяется форма его поперечного сечения. Если ширина поперечного сечения соизмерима с его высотой (изгиб бруса), поперечная кривизна составляет около половины продольной [16]. В общем случае строгое решение задачи в рамках гипотезы плоских сечений неосуществимо.

Анализ работ, посвященных теории изгиба листа, показывает, что на данный момент нет работ, учитывающих комплексное влияние анизотропии заготовки, ее упрочнения в процессе гибки и наличия зоны немонотонной деформации, а также посвященных увеличению зоны пластических деформаций на участках свободного изгиба и последующего их сокращения при протягивании заготовки в матрицу, разгрузки материала, изогнутого по радиусу пуансона. Однако, указанные моменты критически важны для проектирования геометрии, размеров и конструкции штампового инструмента, обеспечивающих компенсацию пружинения. Это связано, в первую очередь, с используемыми ограничениями, необходимыми для вывода простых и применимых на практике аналитических выражений. Одним из решений данной проблемы является использование метода конечных элементов для моделирования процесса гибки.

С помощью метода конечных элементов проведено большое количество вычислительных экспериментов, результаты которых представлены в виде диаграмм для практического использования при конструировании гибочных штампов. Аналогичный подход к конструированию штампов с учетом пружинения излагается в [17, 18, 19]. Задают конечную форму заготовки, с помощью метода конечных элементов рассчитывают распределение сил, по которым в соответствии с известной теоремой А.А. Ильюшина находят перемещения разгрузки.

Многие публикации по вопросам математического моделирования изгиба листа имеют прямое отношение к автоматизации проектирования технологических процессов листовой штамповки. В работе [20] сообщается о разработанной математической модели изгиба листа, привязанной к классификатору гнутых листовых деталей толщиной от 0,5 до 6 мм. Выделено 33 конструкторско-технологических параметра описания детали. Получены коэффициенты регрессии для определения стойкости, стоимости и габаритов штампа.

Непрерывный процесс проектирования гнутых деталей и технологий гибки находит все более широкое применение [21, 22, 23]. После создания трехмерной модели рассчитывается развертка, при этом учитывается способ гибки - в штампах или на машине с поворотной балкой. Для расчета напряжений вводят функцию напряжения текучести, которую можно определить при стандартных испытаниях на растяжение.

Аналитические модели с учетом различных параметров процесса гибки рассматриваются в работах [24, 25, 26]. Аналитическая модель создается с целью повышения точности прогнозирования процесса гибки. В этой модели рассматриваются непрерывные изменения свойств материала на протяжении всего процесса, а также проведены сравнения с экспериментальными результатами, которые показывают, что эта модель может обеспечить высокую точность прогнозирования.

Влияние различных параметров, таких как толщина листа, приложенное усилие и геометрические размеры основных частей штамповой оснастки оценивалось в работах [27, 28]. С использованием аналитических формул и моделирования методом конечных элементов, получены и проанализированы различные модели гибки с учетом упругого пружинения.

В программном комплексе DEFORM проводилось исследование способности высокопрочной стали к пластической деформации при изгибе на угол 90° [29]. В данной работе в качестве критерия разрушения был принят нормализованный критерий Кокрафта-Латама. По полученным экспериментальным данным проведено конечно-элементное моделирование процесса гибки с целью определения критерия разрушения для исследуемого

материала. Результаты расчетов, полученные с использованием созданной кинематической модели, в дальнейшем подтверждались путем проведения реальных испытаний исследуемой высокопрочной стали на изгиб.

1.2.3 Упругое пружинение при гибке

Гибка, являющаяся процессом пластической деформации, сопровождается упругой деформацией, определяемой законом Гука. По окончании гибки упругая деформация устраняется, вследствие чего происходит изменение размеров изделия по сравнению с размерами, заданными инструментом, называемое упругим пружинением.

Упругое пружинение обычно выражается в угловом измерении и является той величиной, на которую следует уменьшить угол гибки, чтобы получить требуемый угол изогнутой детали. Угол пружинения может быть определен двумя способами: аналитическим расчетом упругой деформации или при помощи испытаний и замеров.

При проведении гибочных операций необходимо всегда учитывать наличие упругих деформаций материала, вследствие которых форма изделия после гибки отличается от формы штампа. Поэтому при проектировании и изготовлении штампов для гибки следует учитывать величину пружинения материала.

Величина упругого пружинения различна для свободной гибки без калибровки материала и для гибки в упор с калибровкой материала и чеканкой угла.

Величина пружинения зависит от марки и толщины материала, формы детали, относительного радиуса гибки, угла гибки, а также от силы удара [30]. Чем выше предел текучести $\sigma_{0,2}$ изгибаемого материала, чем больше относительный радиус r/s_0 и меньше толщина материала s_0 и чем больше угол гибки α , тем больше пружинение при прочих равных условиях.

При одноугловой гибке пружинение будет больше, чем при двухугловой. В случае двухугловой гибки на величину пружинения влияет также зазор между матрицей и пуансоном; при отрицательном зазоре (когда зазор меньше толщины материала) пружинение сводится к минимуму.

Большое количество работ посвящено вопросу теоретического расчета величины упругого пружинения. Практически все эти работы описывают пружинение как состояние упругой разгрузки, в результате которой возникают остаточные напряжения. Аналитически величины остаточных напряжений и упругого пружинения, проявляющегося в изменении кривизны и угла изгиба, можно установить на основании теоремы о разгрузке А.А. Ильюшина [31]:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{ост}} &= \sigma_{\text{п}} - \sigma_{\text{разгр}}, \\ \varepsilon_{\text{ост}} &= \varepsilon_{\text{п}} - \varepsilon_{\text{разгр}},\end{aligned}\quad (1.1)$$

где $\sigma_{\text{п}}$ и $\varepsilon_{\text{п}}$ определяются по уравнениям теории пластичности, а $\sigma_{\text{разгр}}$ и $\varepsilon_{\text{разгр}}$ - по теории упругости.

Из уравнений (1.1) легко показать, что конечная кривизна срединной поверхности заготовки равна разности между кривизной под нагрузкой и изменением кривизны при разгрузке:

$$\frac{1}{\rho_{\text{ост}}} = \frac{1}{\rho_{\text{ср}}} - \frac{1}{\rho_{\text{разгр}}},\quad (1.2)$$

где $\rho_{\text{ср}}$ - радиус срединного слоя под нагрузкой, $\rho_{\text{ост}}$ - радиус срединного слоя после разгрузки, $\rho_{\text{разгр}}$ - изменение радиуса срединного слоя при разгрузке.

На основании уравнения (1.2), а также условия равенства момента пластического изгиба и момента упругих деформаций получены приведенные далее выражения для расчета угла упругого пружинения $\Delta\alpha$. Например, в работе [32] для V - образной свободной гибки:

$$tg\Delta\alpha = 0,375 \frac{l}{(1-x)s_0} \frac{\sigma_{0,2}}{E},\quad (1.3)$$

а для П-образной свободной гибки:

$$tg\Delta\alpha = 0,75 \frac{r_m + r_n + 1,25s_0\sigma_{0,2}}{(1-x)s_0E},\quad (1.4)$$

где x – коэффициент, определяющий положение нейтрального слоя в зависимости от r_B/s_0 , l – расстояние между опорами, r_m – радиус матрицы, r_n – радиус пуансона, S_0 – толщина заготовки.

Пружинение как функция изменения радиуса анализируется в работах [33]. Для случаев с относительным радиусом гибки $r_B/s_0 > 10$ представлена зависимость для получения скорректированного радиуса с учетом пружинения:

$$r_B = \frac{r'_g}{1 + 3 \frac{\sigma_{0,2} r'_g}{E}} \quad (1.5)$$

где r_B – скорректированный радиус, r'_g – радиус детали.

В работе [33] угол пружинения представлен как зависимость от радиуса гибки:

$$\Delta\alpha = (180 - \alpha') \left(\frac{r'_g}{r_B} - 1 \right), \quad (1.6)$$

где α' – угол детали после разгрузки.

В приведенных формулах [32, 33] не учитывается упрочнение, возникающее в процессе деформации металла. В работе [14] угол пружинения представлен в зависимости от радиуса и толщины образца с учетом упрочнения (использовалась линейная аппроксимация кривой упрочнения):

$$\Delta\alpha = \frac{\frac{3}{2\sigma_{0,2}} + \frac{\Pi s_0}{2r_B + s_0}}{E} \left(\frac{r_B}{s_0} + 1 \right) \alpha, \quad (1.7)$$

где α – уголгиба, Π – модуль упрочнения.

По формуле (1.7) угол пружинения представлен прямой зависимостью от изгибаемого угла, что не всегда согласуется с экспериментальными данными. Этот недостаток устранен в работах [34], в которых был проведён расчёт угла пружинения при больших радиусах гибки:

$$\Delta\alpha = \frac{3\sigma_{0,2}\rho_n(\pi - \alpha)}{E s_0} + \frac{\Pi}{E} (\pi - \alpha), \quad (1.8)$$

при малых радиусах гибки:

$$\Delta\alpha \approx \frac{3\sigma_{0,2}\rho_n(\pi - \alpha)}{Es_o} + \frac{\Pi}{E}(\pi - \alpha) + \frac{6\sigma_{0,2}\rho_n}{Es_o \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} - \frac{l\sigma_{0,2}}{Es_o \sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (1.9)$$

В работе А.Д. Матвеевым [21] при анализе двухугловой гибки листовых заготовок как немонотонного упругопластического изгиба листа бесконечной ширины показано, что упругие деформации при разгрузке заготовки могут привести к продольным деформациям, равномерно распределённым по соответствующим сечениям, и деформациям изгиба.

Анизотропия не влияет на положение нейтрального слоя, но несмотря на это [35], она оказывает значительное влияние на распределение напряжений, а значит и на упругое пружинение. Так в работе [36] выведена зависимость для расчета угла пружинения анизотропной заготовки, упрочнение которой подчиняется степенному закону:

$$\Delta\alpha = \frac{3K'_\theta(1 - \vartheta_1\vartheta_2)}{(n + 2)E_1} \left(\frac{2r_B}{s_o} + 1 \right)^{1-n} \alpha, \quad (1.10)$$

где K'_θ – коэффициент упрочнения, учитывающий анизотропию свойств, n – степень упрочнения, ϑ_1 и ϑ_2 – коэффициенты Пуассона материала заготовки в направлении прокатки и поперечном направлении.

Таким образом, не смотря на большое разнообразие подходов к расчету упругого пружинения, на данный момент нет формул, позволяющих комплексно учесть влияние анизотропии свойств заготовки, ее деформационного упрочнения и утонения на упругое пружинение при гибке.

1.4 Способы снижения пружинения при двухугловой гибке

Точность угловых размеров зависит от правильного учета компенсации пружинения заготовок при гибке. Для компенсации угла пружинения при двухугловой гибке применяют поднутрение на пуансоне, равное углу пружинения (рисунок 1.8, а и в), либо небольшой радиусный выгиб средней полки (рисунок 1.8, б и г) [32].

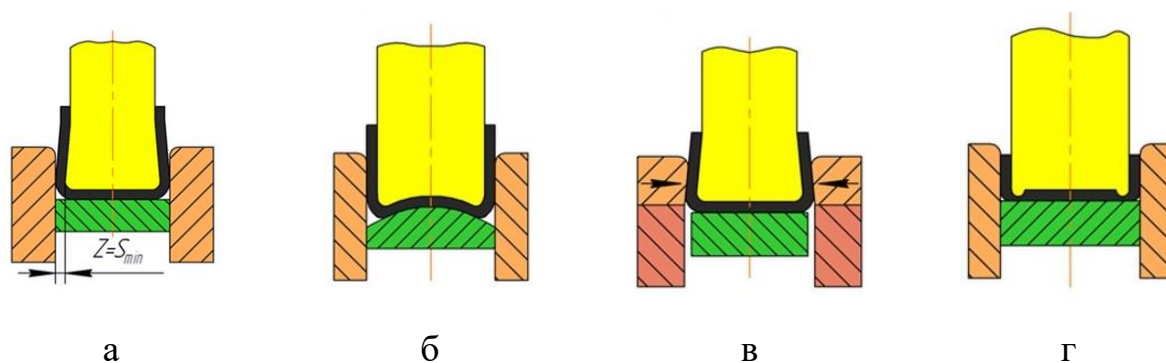


Рисунок 1.8 – Способы компенсации угла пружинения при двухугловой гибке

Наиболее радикальным средством компенсации пружинения является изгиб на углы менее 90° при помощи дополнительного перемещения гибочных инструментов в конце гибки (рисунок 1.9) [37]. Однако, применение подобных схем имеет ограниченный характер из-за повышения стоимости и снижения работоспособности штампов. К числу достоинств данных схем нужно отнести возможность регулирования угла изгиба [38].

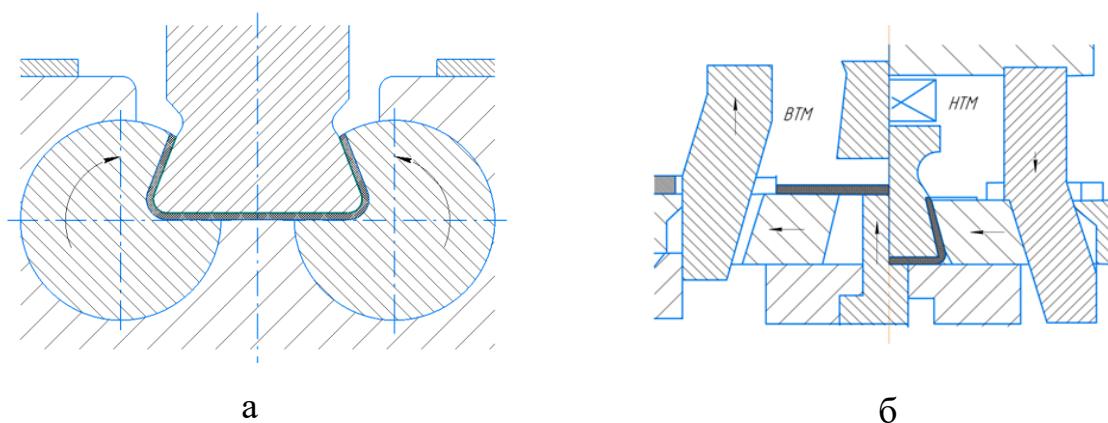


Рисунок 1.9 - Примеры конструкций подвижных секций гибочных матриц

Кроме того, гибка в подобных штампах может приводить к повреждению поверхности заготовок, что недопустимо в ряде случаев. Избежать этого позволяет схема с шарнирным соединением гибочных инструментов, недостатком которой является невозможность регулирования

величины угла гибки, т.е. пружинение компенсируется всегда одинаково, поэтому точность угловых размеров зависит от стабильности свойств и толщины заготовок (рисунок 1.10) [39, 40, 41].

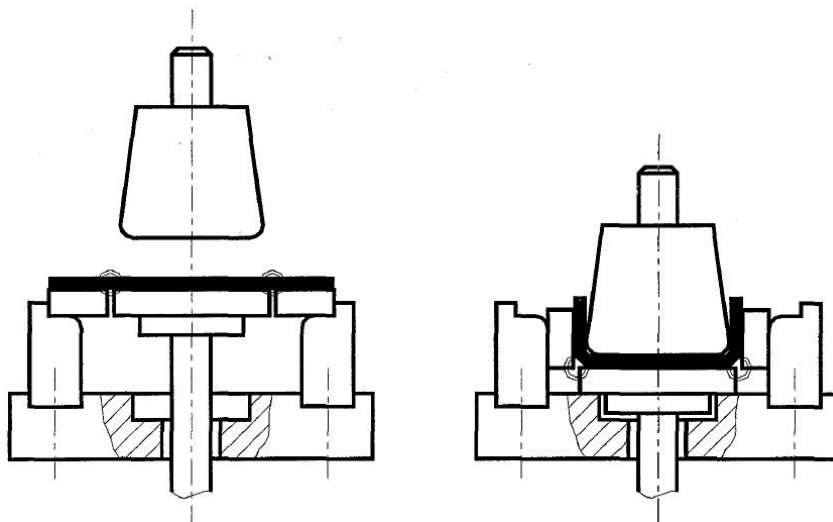


Рисунок 1.10 - Схема двухугловой гибки с шарнирным соединением гибочных инструментов

Разработан ряд схем П-образной гибки, в которых отсутствуют сложные шарнирные и клиновые механизмы перемещения инструментов, например, узел подгибки выполняют в виде двух пар регулировочных упоров, вызывающих качение выталкивателя и пуансона в процессе протягивания заготовки в матрицу, при этом края заготовки поочередно изгибаются на углы менее 90° [42].

Широкое распространение получили штампы для П-образной гибки с одновременным упругим изгибом донной части изделия, выпрямление которой компенсирует пружинение и обеспечивает параллельность стенок [43, 44, 45]. Однако, данная схема исключает возможность регулирования компенсации пружинения в случае нестабильности свойств заготовки. Такой же недостаток имеет способ компенсации пружинения при гибке, рассмотренный в статье [45]. Он заключается в строгом дозировании давления прижима, при котором дно изделия доштамповывается в момент

жесткого взаимодействия с пуансоном и прижимом. При этом используется зависимость оптимального усилия прижима от параметров заготовки и инструмента.

Практический опыт свидетельствует о том, что параллельность стенок изделий П-образного сечения можно обеспечить, протягивая заготовки в зазоры, меньшие толщины изгибаемого материала на 3-5% [44]. Однако, данный способ не применим для деталей, на внешней стороне которых не допускаются задиры и царапины [46]. В этом случае рекомендуют создавать в местах заготовки, подлежащих изгибу поля остаточных напряжений, которые уменьшают или полностью исключают пружинение при гибке. Для этого производят вдавливание выступов штампового инструмента в местах изгиба на глубину 0,05-0,10 мм толщины заготовки при ширине очагов деформации 1,3-2,0 от протяженности внутреннего криволинейного участка заготовки [47].

Для повышения точности гибки применяют также калибровку радиусных участков деталей, при этом отношение радиусов пуансонов гибки и калибровки равно $r_{\text{ПК}} = 1,25r_{\text{ПК}}$ обеспечивает наибольший эффект.

Существует способ, в котором для компенсации пружинения осуществляют прижим центральной части заготовки, свободный изгиб концевых участков с их перегибом и протягивание в матрицу концевых участков заготовки. Причем перегиб концевых участков на стадии их свободного изгиба осуществляют кромками пуансона и матрицы при расстоянии между ними, равном тройной длине развертки радиусной части детали [48]. На рисунке 1.11 показано положение заготовки при свободном изгибе кромками матрицы и пуансонов, а также при протягивании в матрицу (справа).

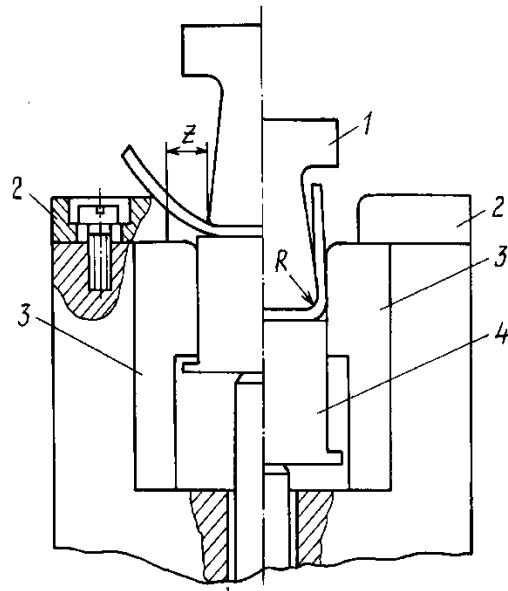


Рисунок 1.11 – Схема процесса гибки в П-образном штампе: 1 – пуансон, 2 – прижим, 3 – матрица, 4 – выталкиватель, Z – величина зазора между матрицей и пуансоном

Вследствие полученного перегиба угол гибки α получается менее 90° . Зазор несколько больше толщины заготовки S_0 , поэтому угол α возрастает по мере протягивания заготовки в матрицу. Глубину протягивания подбирают при реализации способа так, чтобы получить после пружинения заготовки угол 90° . Таким образом, способ позволяет проводить П-образную гибку с учетом нестабильного пружинения заготовок.

Данный способ имеет недостаток в необходимости точно улавливать зазор Z , так как при недостаточном зазоре будет недогиб, а при избыточном перегиб.

В производстве высокотехнологической продукции машиностроения детали П-образного сечения также получают по схемам гибки, совмещенным с продольным растяжением или сжатием материала, так называемый стесненный изгиб [49, 50, 51]. Наложение сжимающих напряжений позволяет минимизировать величину радиуса гибки, что особенно важно при обработке малопластичных материалов [52]. При этом в зоне радиуса сопряжения

вместо традиционного утонения наблюдается утолщение материала до 8-23%, а пружинение изгибаемых бортов уменьшается в несколько раз и при $r_b/s_0 < 3$ не превышает 1% [53].

При изготовлении деталей большой длины, служащих элементами продольной жесткости летательных аппаратов, применяют гибку-прокатку в роликах [54, 55], гибку на машинах с поворотной балкой [56]. При гибке на машинах с поворотной балкой в отличие от гибки в штампе геометрия инструмента не влияет на угол гибки, так как оператор задает угол поворота балки на пульте управления, как следствие точность и повторяемость не зависят от колебаний свойств и толщины заготовки. Кроме того, облегчается и переналадка под другую деталь, так как в отличие от традиционной гибки не требуется замена матрицы и пуансона. Недостатком гибки на машинах с поворотной балкой является то, что перемещение материала по кромке матрицы вызывает образование царапин и износ инструментов.

При гибке крупногабаритных заготовок используют оборудование с числовым программным управлением [57-62], что позволяет реализовать процессы гибки П-образных и других деталей сложной формы с учетом пружинения материала. Другой вид автоматического управления гибкой предусматривает установку датчиков, регистрирующих перемещение заготовки при активном пружинении и упругой разгрузке [63]. Результаты измерений служат исходными данными для корректировки управляющей программы. Тем самым достигаются требуемые размеры гнутых деталей. В работе [64] сообщается, что управление листогибочным прессом осуществляется по результатам измерения угла детали и длины отогнутого края. Достигается точность повторения размеров около 0,01 мм. Это означает, что при ширине детали 12 мм и толщине 1,5 мм угловой допуск составляет 0,1°. Большое влияние на точность угла имеет износ инструмента. Помимо высокой точности, система управления обеспечивает быстрое перемещение пуансона - до 500 мм/с.

Анализ существующих схем П-образной гибки показывает, 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.

1.5 Использование упругих элементов в конструкции штамповой оснастки

Для поиска новых решений для гибки и новых способов к усовершенствованию элементов штамповой оснастки, обеспечивающих снижение упругого пружинения при гибке, рассмотрены различные способы с применением упругих элементов в конструкции штамповой оснастки.

Один из таких примеров - штамп для глубокой вытяжки осесимметричных деталей [64]. Вытяжку листовой заготовки производят с упругими прижимом и матрицей, прилегающими по всей поверхности фланца в течение всего процесса (рисунок 1.12). Прижим и матрица выполнены в виде металлических колец, которые обеспечивают упругие перемещения, позволяющие прижать фланец заготовки с необходимым давлением по всей его поверхности. При этом матрица установлена на неподвижное опорное кольцо. Повышается качество поверхности изделия, его точность, устраняется интенсивное гофрообразование фланца, снижается усилие прижима, повышается предельный коэффициент вытяжки.

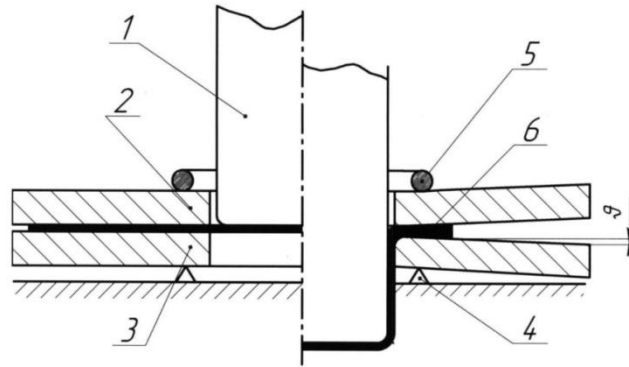


Рисунок 1.12 - Схема вытяжки с упругими элементами: 1 - пуансон, 2 - прижим, 3 - матрица, 4 - опорное кольцо, 5 - прижимное кольцо, 6 - заготовка

Рассмотрим способ гибки листового материала с использованием плоских пластин (рисунок 1.13) [65], направленный на повышение качества поверхности изготавливаемых деталей и повышение срока службы штампа. Это достигается тем, что перед гибкой между матрицей и заготовкой в зонегиба устанавливают две плоские пластины, которые размещают по обе стороны от оси матрицы, а между пуансоном и заготовкой размещают изогнутую по форме пуансона прокладку. При этом две плоские пластины при движении пуансона вниз движутся вместе с заготовкой в рабочее пространство матрицы, скользя по радиусу закругления последней и предохраняя металл заготовки от трения по радиусу закругления матрицы пластины. Прокладку и пластины выполняют из высокопрочного металла. Применение таких прокладок и пластин значительно повышает износостойкость рабочих поверхностей пуансона и матрицы.

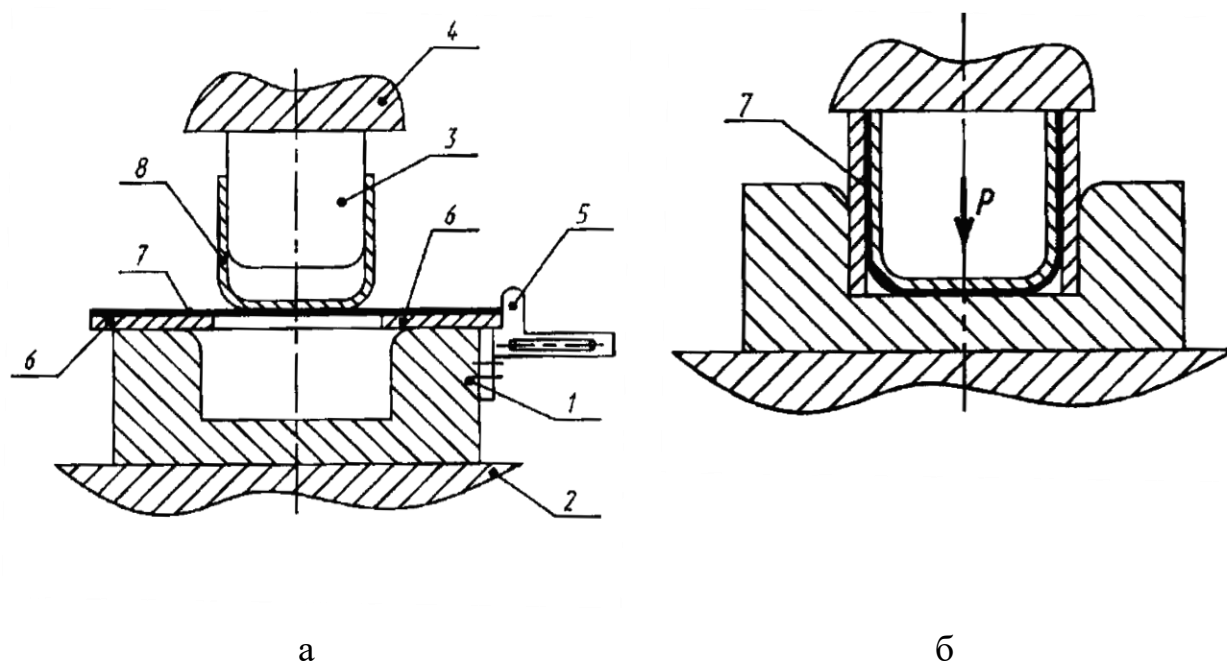


Рисунок 1.13 – Схема процесса гибки с использованием плоских пластин:
 а -положение штампа в начальный момент гибки, б - положение штампа в
 заключительный момент гибки, 1 – матрица, 2 – стол пресса, 3 – пуансон,
 4 – ползун пресса, 5 – фиксатор, 6 – плоские титановые пластины,
 7 – заготовка, 8 – прокладка, P – усилие гибки

Данный способ гибки листового материала обеспечивает высокое качество изготовления деталей, отсутствие рисок на внутренней и наружной поверхностях. При этом прокладки во время гибки не подвергаются деформации и их можно использовать многократно. Кроме того, повышается срок службы штампа, так как износ рабочих поверхностей пуансона и матрицы компенсируется толщиной пластин и прокладок. Недостатком данного способа является включение дорогостоящих компонентов штамповой оснастки, а также предварительный дополнительный нагрев перед гибкой.

Известна конструкция штампа для стеснённого изгиба листовых деталей и отрезки заготовок от полосы за один ход пресса (рисунок 1.14). Пуансон выполнен из эластомера, между пуансонодержателем и корпусом

расположен стержень из эластомера, между матрицей и выталкивателем установлен стержень из эластомера. Заготовка изгибается в полуцилиндр до того момента, как опустится к выталкивателю, который начинает сжимать стержень, одновременно корпус сжимает стержень, пока выступы на корпусе не упрутся в пуансонодержатель. Эластичный пуансон при дальнейшем давлении на него деформируется, изгибая заготовку из полуцилиндрического в уголкового сечение. Выпрямление стенки заготовки и действие сил трения со стороны пуансона способствуют смещению материала заготовки в ее угловые участки. Окончательное деформирование заготовки производится уступами корпуса, которые передают усилие прессы на торцы изгибаемых полок. Штамп обеспечивает утолщение материала в зонегиба, уменьшение радиусагиба и пружинения, что повышает прочность, жёсткость, качество и ресурс деталей, а также производительность труда [66, 67, 68].

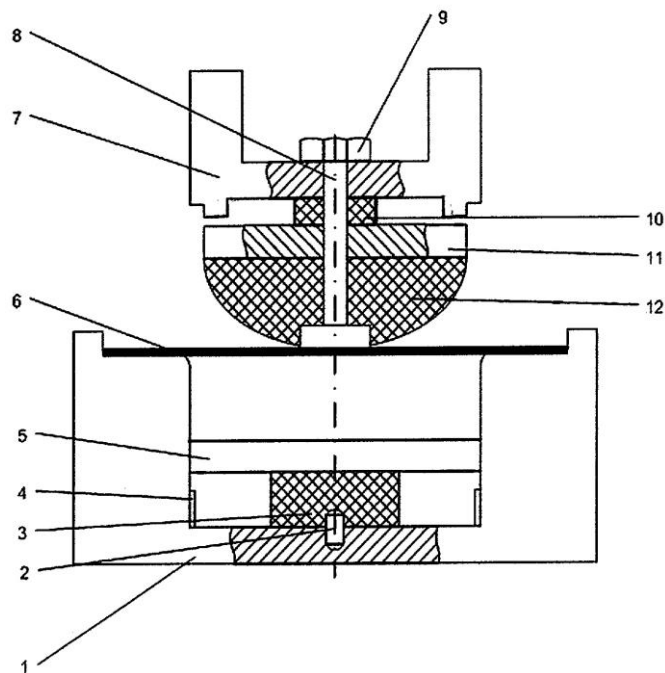


Рисунок 1.14 - Схема штампа для изгиба листовых деталей: 1 – матрица;
 2 – штифт; 3 – стержень; 4 – упор; 5 – выталкиватель; 6 – заготовка;
 7 – корпус; 8 – винт; 9 – гайка; 10 – эластомер; 11 – пуансонодержатель;
 12 – пуансон

Также разработана конструкция штампа с разъёмной матрицей, состоящей из двух частей, синхронно раздвигающихся и сдвигающихся по направляющим плиты с помощью винта, что позволяет штамповать заготовки разных поперечных размеров с большей производительностью за одну операцию [69].

Способ гибки длинномерных полых изделий с профилем открытого типа, включающий размещение внутри заготовки набора вставок и совместную гибку заготовки и вставок рассмотрен в [70]. В каждую из открытых полостей заготовки устанавливают набор вставок из стальных полос с возможностью их продольного смещения каждой из полос друг относительно друга и соответственно относительно заготовки в процессе гибки, при этом вставку располагают в открытой полости заготовки по всей длине профиля, а гибку заготовки с набором вставок производят на валках, выполненных в виде роликов с шириной рабочей части между ограничителями, равной ширине заготовки с размещенными в ней вставками, причем гибку профиля осуществляют в зоне пластических деформаций, а изгиб стальных полос в области упругих деформаций.

Процесс гибки для углов менее 90° представлен в [71] (рисунок 1.15). Использование упругого элемента в штампе позволяет снизить угол пружинения. В данной работе упругий элемент частично меняет свой угол и переходит в упругое состояние. Это позволяет влиять на угол посредством наладки хода пуансона. Эта конструкция применима в единичном или мелкосерийном производстве, где используются специализированные штампы для получения деталей.

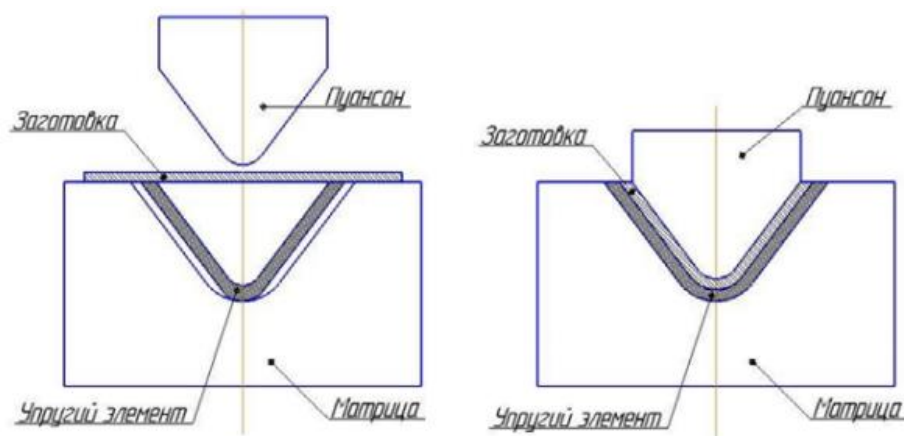


Рисунок 1.15 - Принципиальная схема штампа с использованием упругого элемента для V-образной гибки

Рассмотрев различные способы гибки с упругими элементами, проставками, пластинами, можно сделать вывод, что существующие способы не обеспечивают в полной мере управления углом пружинения, не дают возможность влиять на него после завершения гибки, не обеспечивают универсальности способа гибки.

1.6 Выводы по главе и основные задачи исследования

В соответствии с проведенным аналитическим обзором можно сделать следующие выводы:

1. На данный момент отсутствуют аналитические модели процесса гибки, которые бы комплексно учитывали анизотропию свойств и деформационное упрочнение заготовки, а также ее утонение в процессе изгиба. Соответственно невозможно вести расчеты напряженно-деформированного состояния, силовых параметров, упругого пружинения и предельных деформаций при гибке с учетом перечисленных выше факторов.

2. К основной проблеме, связанной с двухугловой гибкой П-образных изделий, относятся пружинение и повреждение поверхности материала. На

данный момент для снижения упругого пружинения используются дополнительные доводочные операции, специальные штампы, имеющие сложную конструкцию, специализированное дорогостоящее оборудование с программным управлением.

3. Для повышения точности и качества П-образных изделий необходимо изменение традиционных схем двухугловой гибки, обеспечивающее компенсацию пружинения на стадии свободного изгиба заготовки, чтобы не требовалось дополнительных затрат на оснастку и выполнение дополнительных операций.

4. Нестабильность свойств и толщины заготовок создает дополнительные трудности в достижении высокой точности и качества П-образных изделий. Разрабатываемая схема двухугловой гибки и методика проектирования технологии должны учитывать данные обстоятельства и предусматривать средства компенсационного характера.

5. Для разработки способа снижения упругого пружинения при двухугловой гибке с использованием упругих элементов в настоящее время отсутствует методика расчета технологических параметров, в том числе с учетом анизотропии и элементов конструкции штампа, пределов использования способа.

Поэтому целью диссертационного исследования является снижение величины упругого пружинения при двухугловой гибке деталей в штампе 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.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ГИБКИ МОМЕНТОМ С УЧЁТОМ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ ЗАГОТОВКИ, ЕЁ УПРОЧНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ

2.1 Постановка задачи, принимаемые допущения

Рассмотрим случай кругового изгиба анизотропной, упрочняющейся полосы шириной B , толщиной s_0 моментом M_u (рисунок 1.4) с учетом ее утонения.

При анализе конечного кругового изгиба листа примем следующие допущения:

1) будем рассматривать гибку широкой полосы $B \gg s_0$, поэтому можно считать, что ширина полосы в процессе гибки не изменяется ($\mathcal{E}_z = 0$), а значит имеет место плоское деформированное состояние;

2) имеет место строгая концентричность наружной (выпуклой) поверхности рассматриваемой части листа её внутренней (выгнутой) поверхности;

3) материальные элементы, расположенные в рассматриваемой стадии процесса изгиба на общей нормали к поверхностям листа, во всех предшествующих стадиях процесса также располагаются на общей нормали к поверхности листа (справедлива гипотеза плоских сечений);

4) при этих условиях главные оси напряжений и деформаций можно считать неизменно совпадающими с радиальным, тангенциальным направлениями и направлением ребрагиба, тогда касательные напряжения $\tau_{r\theta} = 0$ отсутствуют;

5) будем пренебрегать упругими деформациями, а значит будем считать изменение объёма любой материальной частицы в процессе деформации равным нулю (справедливо условие несжимаемости);

б) материал заготовки является изотропно-упрочняющимся, ортотропным, свойства материала при сжатии и растяжении одинаковы;

7) рассмотрим только случаи, когда главные оси анизотропии совпадают с главными осями напряжений, то есть ребро гиба располагается или вдоль, или перпендикулярно направлению прокатки;

8) процесс деформации при круговом изгибе является не монотонным по толщине, однако, так как главные оси скорости деформации неизменно совпадают по направлению с одними и теми же материальными волокнами и, принимая во внимание результаты эффекта Баушингера, то есть возможность постепенного уменьшения интенсивности напряжений после изменения знаков главных компонентов скорости деформаций [1], можно считать, что выбранная функция упрочнения остаётся в силе по всей толщине изгибаемого листа.

2.2 Модель анизотропного упрочняющегося материала

Для учёта анизотропии свойств изгибаемой листовой заготовки воспользуемся линеаризованным критерием пластичности, предложенным в [36]:

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \pm \beta \sigma_i, \quad (2.1)$$

где знак «+» относится к зоне растяжения ($r > \rho_H$); знак «-» относится к зоне сжатия ($r < \rho_H$); σ_i – напряжение течения материала заготовки; β – коэффициент Лоде, который как показано в [8], одинаков и для зоны растяжения, и для зоны сжатия и зависит только от анизотропии. Так для плоского деформированного состояния, если направление прокатки перпендикулярно ребру гиба, то

$$\beta_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu_{12}\mu_{21}}}; \quad (2.2)$$

а если направление прокатки параллельно ребру гиба, то

$$\beta_{\parallel} = \frac{\sqrt{\mu_{12}}}{\sqrt{\mu_{21}(1 - \mu_{12}\mu_{21})}}. \quad (2.3)$$

Здесь μ_{12} и μ_{21} – коэффициенты поперечной деформации для поперечного направления и направления прокатки исходной листовой заготовки. Коэффициенты поперечной деформации показывают соотношение поперечной деформации к продольной деформации при одноосном растяжении образца [8].

Для учёта упрочнения воспользуемся степенной аппроксимацией кривой упрочнения [30]:

$$\sigma_i = A(\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^n, \quad (2.4)$$

где ε_i – интенсивность пластических деформаций; ε_0 – степень упругой деформации, при которой достигается предел текучести; A , n – константы упрочнения. Их значения определяют из условия прохождения функции через точки с координатами $\sigma_i = \sigma_{0,2}$ при $\varepsilon_i = 0$, $\sigma_i = \sigma_b(1 + \delta_p)$ при $\varepsilon_i = \ln(1 + \delta_p)$, а также из условия максимума усилия растяжения $dP=0$ при $\varepsilon_i = \ln(1 + \delta_p)$:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_b(1 + \delta_p)}{\sigma_{0,2}} &= \frac{n^n}{[n - \ln(1 + \delta_p)]^n}, \\ \varepsilon_0 &= n - \ln(1 + \delta_p), \\ A &= \frac{\sigma_b(1 + \delta_p)}{n^n} = \frac{\sigma_{0,2}}{[n - \ln(1 + \delta_p)]^n}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести; σ_b – предел прочности; δ_p – относительное удлинение материала заготовки. Первое из уравнений (2.5) можно решить только численно. Значения $\sigma_{0,2}$, σ_b и δ_p определяются при испытании на растяжение образцов, вырезанных вдоль направления прокатки.

Запишем выражение для интенсивности деформаций с учётом условия несжимаемости [36]:

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{\mu_{12}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}} \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2}{\mu_{12}} + 2\varepsilon_1\varepsilon_2 + \frac{\varepsilon_2^2}{\mu_{21}}}, \quad (2.6)$$

где направление главных осей напряжений и анизотропии 1 совпадает с направлением прокатки, а 2 – с поперечным направлением.

Запишем выражение (2.6) следующим образом:

$$\varepsilon_i = K|\varepsilon_\theta|, \quad (2.7)$$

где K – коэффициент, учитывающий схему напряженно-деформированного состояния и направление главных осей анизотропии относительно главных осей напряжений.

Тогда если направление прокатки перпендикулярно ребру гiba (направление 1 совпадает с тангенциальным направлением, направление 2 – с ребром гiba, направление 3 – с радиальным направлением), то с учётом плоской деформации $\varepsilon_z = 0$, получим:

$$K_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu_{12}\mu_{21}}}, \quad (2.8)$$

а если направление прокатки параллельно ребру гiba (направление 1 совпадает с ребром гiba, направление 2 – с тангенциальным направлением, направление 3 – с радиальным направлением):

$$K_{\parallel} = \frac{\sqrt{\mu_{12}}}{\sqrt{\mu_{21}(1 - \mu_{12}\mu_{21})}}. \quad (2.9)$$

Таким образом, значение коэффициента K совпадает с коэффициентом Лоде β (2.2)-(2.3), тогда уравнение (2.7) запишем как:

$$\varepsilon_i = \beta|\varepsilon_\theta|. \quad (2.10)$$

2.3 Напряженно-деформированное состояние при круговом изгибе листа

Рассмотрим сечение изгибаемого листа в плоскости, перпендикулярной ребру гибки, до и после деформации (рисунок 2.1). Пусть $A'B'C'D'$ – сечение, перпендикулярное ребру гiba рассматриваемой частицы изгибаемого листа, ограниченной двумя плоскостями $A'C'$ и $B'D'$, проходящими через общую для наружной поверхности ($A'B'$) и для внутренней ($C'D'$) линию центров кривизны O . До деформации это сечение имело форму прямоугольника со сторонами $ABCD$: $AC = BD = s_0$; $AB = CD = l_0$.

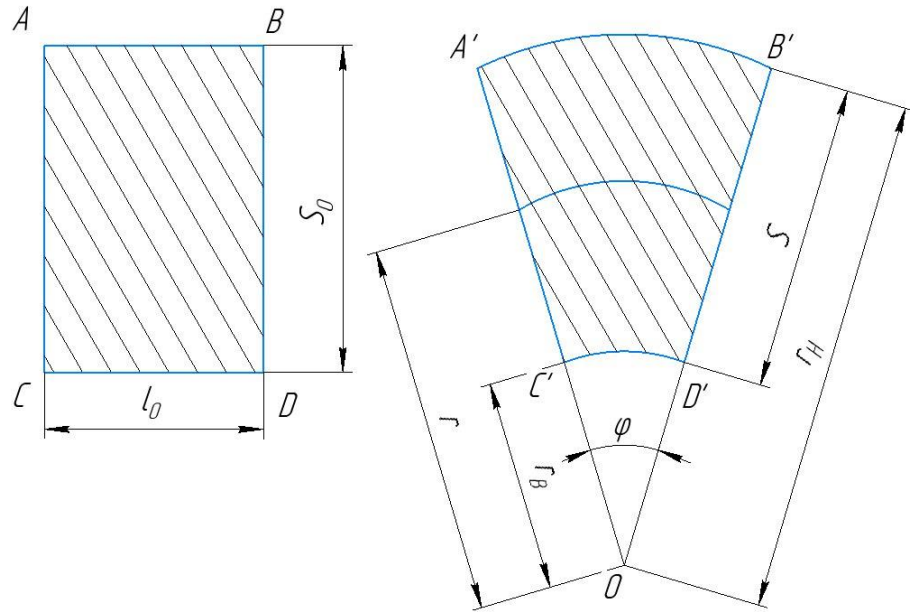


Рисунок 2.1 – Сечение материальной частицы изгибаемого листа в плоскости, перпендикулярной ребругиба: а – до деформации, б – после деформации

Так как деформация в направлении ребрагиба равна нулю $\varepsilon_z = 0$, объем не меняется, то площадь рассматриваемого сечения остается неизменной в процессе деформации:

$$\frac{\varphi}{2} (r_H^2 - r_B^2) = l_0 s_0, \quad (2.11)$$

где φ – угол, ограничивающий рассматриваемый круговой элемент.

Учитывая, что толщина листа s в рассматриваемой стадии деформации изгиба равна:

$$s = r_H - r_B, \quad (2.12)$$

получаем:

$$\frac{r_H}{2} + \frac{r_B}{2} = \frac{l_0 s_0}{\varphi s}. \quad (2.13)$$

Решая систему двух уравнений (2.12) и (2.13) относительно переменных в процессе изгиба радиусов кривизны r_H и r_B , имеем:

$$r_H = \frac{l_0 s_0}{\varphi s} + \frac{s}{2}; \quad (2.14)$$

$$r_B = \frac{l_0 s_0}{\varphi s} - \frac{s}{2}. \quad (2.15)$$

Воспользуемся основной зависимостью теории кругового изгиба листа, выведенной из чисто геометрических (кинематических) соображений [73,74]:

$$\rho_H^2 = r_H r_B \left(1 + 2 \frac{\varphi}{s} \frac{ds}{d\varphi} \right). \quad (2.16)$$

Уравнение (2.16) связывает между собой все геометрические параметры задачи кругового изгиба, но не учитывает механической (силовой) стороны, в том числе свойств листовой заготовки и их анизотропии. В случае, если утонением при гибке можно пренебречь, радиус нейтрального слоя по напряжениям может быть определен известным уравнением:

$$\rho_H = \sqrt{r_H r_B}. \quad (2.17)$$

Далее воспользуемся подходом Г.А. Смирнова-Аляева [73] для решения задачи кругового изгиба изотропной заготовки. Для этого рассмотрим распределение интенсивности деформаций по толщине изгибаемой заготовки, в частности, на выпуклой (наружной), вогнутой (внутренней) и нейтральной по напряжениям поверхностях.

При $r = r_H$ на выпуклой поверхности (рисунок 2.2) мы получаем выражение деформации в тангенциальном направлении:

$$\varepsilon_{\theta_H} = \ln \frac{\varphi r_H}{l_0} > 0 \text{ (так как } \varphi r_H > l_0 \text{)}. \quad (2.18)$$

Тогда с учетом (2.10) получим:

$$\varepsilon_{iH} = \beta |\varepsilon_{\theta_H}| = \beta \ln \frac{\varphi r_H}{l_0}. \quad (2.19)$$

При $r = r_B$ на вогнутой поверхности

$$\varepsilon_{\theta_B} = \ln \frac{\varphi r_B}{l_0} < 0 \text{ (так как } \varphi r_B < l_0 \text{)} \quad (2.20)$$

и

$$\varepsilon_{iB} = \beta |\varepsilon_{\theta_B}| = \beta \ln \frac{l_0}{\varphi r_B}. \quad (2.21)$$

Аналогично получаем выражение интенсивности деформации при $r = \rho_H$:

$$\varepsilon_{iv} = \beta \ln \frac{l_0}{\varphi \rho_H}. \quad (2.22)$$

Продифференцируем оба равенства (2.19) и (2.21) по φ и примем во внимание равенства (2.13)-(2.15), а также равенства, получаемые в результате дифференцирования по φ равенств (2.14) и (2.15). После ряда несложных преобразований получим:

$$\begin{aligned} \varphi \frac{d\varepsilon_{iH}}{d\varphi} &= \frac{\beta}{2} \left(1 - \frac{\rho_H^2}{r_H^2} \right); \\ \varphi \frac{d\varepsilon_{iB}}{d\varphi} &= \frac{\beta}{2} \left(\frac{\rho_H^2}{r_B^2} - 1 \right). \end{aligned} \quad (2.23)$$

Используя уравнения (2.19), (2.21) и (2.22), можно написать:

$$\frac{\rho_H^2}{r_H^2} = e^{-\frac{2}{\beta}(\varepsilon_{iH} + \varepsilon_{iv})}; \quad (2.24)$$

$$\frac{\rho_H^2}{r_B^2} = e^{\frac{2}{\beta}(\varepsilon_{iB} - \varepsilon_{iv})}. \quad (2.25)$$

Подставляя выражения (2.24) и (2.25) в равенства (2.23), имеем:

$$\begin{aligned} \varphi \frac{d\varepsilon_{iH}}{d\varphi} &= \frac{\beta}{2} \left[1 - e^{-\frac{2}{\beta}(\varepsilon_{iH} + \varepsilon_{iv})} \right]; \\ \varphi \frac{d\varepsilon_{iB}}{d\varphi} &= \frac{\beta}{2} \left[e^{\frac{2}{\beta}(\varepsilon_{iB} - \varepsilon_{iv})} - 1 \right]. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Разделив почленно второе из равенств (2.26) на первое, получаем после несложных алгебраических преобразований:

$$\frac{d\varepsilon_{iB}}{d\varepsilon_{iH}} = \frac{e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iB}} - e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iv}}}{e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iv}} - e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_{iH}}}. \quad (2.27)$$

Равенство (2.27) в отличие от равенства (2.16), уже учитывает пластическую анизотропию, но этого равенства еще недостаточно, чтобы определить все необходимые геометрические параметры задачи кругового изгиба листа, поскольку оно связывает три переменных в процессе деформации величины: ε_{iB} , ε_{iv} , ε_{iH} .

Функциональную связь двух из этих величин с третьей, которую можно было бы принять за аргумент, нельзя получить вне зависимости от силовой картины явления, от способности данного материала сопротивляться пластической деформации, от механических характеристик этого материала.

Запишем условие равновесия для случая кругового изгиба:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r}. \quad (2.28)$$

Тогда с учетом условия пластичности (2.1) для зоны сжатия (рисунок 1.4) имеем при $r_B \leq r \leq \rho_H$:

$$d\sigma_r = -\beta\sigma_i \frac{dr}{r} \quad (2.29)$$

и для зоны растяжения при $\rho_H < r \leq r_H$:

$$d\sigma_r = \beta\sigma_i \frac{dr}{r}. \quad (2.30)$$

Так как длина нейтрального слоя радиусом ρ_0 по итоговой деформации не уменьшилась и не увеличилась в тангенциальном направлении, то

$$l_0 = \rho_0\varphi. \quad (2.31)$$

Тогда с учетом (2.31) запишем уравнение для интенсивности деформаций при $r > \rho_0$:

$$\varepsilon_i = \beta \ln \frac{r\varphi}{l_0} = \beta \ln \frac{r}{\rho_0} \quad (2.32)$$

при $r < \rho_0$:

$$\varepsilon_i = \beta \ln \frac{l_0}{r\varphi} = \beta \ln \frac{\rho_0}{r}. \quad (2.33)$$

Откуда дифференцируя ε_i по r , получаем при $r > \rho_0$:

$$\frac{dr}{r} = \frac{1}{\beta} d\varepsilon_i, \quad (2.34)$$

и если $r < \rho_0$:

$$\frac{dr}{r} = -\frac{1}{\beta} d\varepsilon_i. \quad (2.35)$$

Подставляя (2.34)-(2.35) в уравнение (2.29), запишем:

$$d\sigma_r = \sigma_i d\varepsilon_i (r_B \leq r \leq \rho_H \text{ и } \varepsilon_{iv} \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_{iB}), \quad (2.36)$$

а в уравнение (2.30):

$$d\sigma_r = -\sigma_i d\varepsilon_i (\rho_H < r < \rho_0 \text{ и } 0 < \varepsilon_i < \varepsilon_{iv}), \quad (2.37)$$

$$d\sigma_r = \sigma_i d\varepsilon_i (\rho_0 \leq r \leq r_H \text{ и } 0 \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_{iH}). \quad (2.38)$$

Интегрируя уравнения (2.36-2.38) и замечая, что при $r = r_H$ и при $r = r_B$, то есть на свободных от внешних нагрузок (для кругового изгиба) поверхностях, $\sigma_r = 0$, получаем:

$$\sigma_r = - \int_{\beta \ln \frac{\rho_0}{r}}^{\varepsilon_{iB}} \sigma_i d\varepsilon_i \text{ при } r_B \leq r \leq \rho_H; \quad (2.39)$$

$$\sigma_r = - \int_0^{\beta \ln \frac{\rho_0}{r}} \sigma_i d\varepsilon_i + C \text{ при } \rho_H \leq r \leq \rho_0; \quad (2.40)$$

$$\sigma_r = - \int_{\beta \ln \frac{r}{\rho_0}}^{\varepsilon_{iH}} \sigma_i d\varepsilon_i \text{ при } \rho_0 \leq r \leq r_H; \quad (2.41)$$

где C – константа интегрирования.

Зная распределение радиальных напряжений σ_r по толщине изгибаемой заготовки, из условия пластичности (2.1) можно определить и тангенциальное напряжение σ_θ .

Замечая, что σ_r не претерпевает разрыва ни при $r = \rho_H$, ни при $r = \rho_0$, а также, что

$$\varepsilon_{iv} = \beta \ln \frac{\rho_0}{\rho_H}, \quad (2.42)$$

приравняем правые части уравнений (2.39) и (2.40) при $r = \rho_H$:

$$- \int_{\varepsilon_{iv}}^{\varepsilon_{iB}} \sigma_i d\varepsilon_i = - \int_0^{\varepsilon_{iv}} \sigma_i d\varepsilon_i + C, \quad (2.43)$$

и правые части уравнений (2.40) и (2.41) при $r = \rho_0$:

$$C = - \int_0^{\varepsilon_{iH}} \sigma_i d\varepsilon_i. \quad (2.44)$$

Используя свойства определенного интеграла, распишем левую часть уравнения (2.43) и подставим в правую часть C из уравнения (2.44):

$$- \int_0^{\varepsilon_{iB}} \sigma_i d\varepsilon_i + \int_0^{\varepsilon_{iv}} \sigma_i d\varepsilon_i = - \int_0^{\varepsilon_{iv}} \sigma_i d\varepsilon_i - \int_0^{\varepsilon_{iH}} \sigma_i d\varepsilon_i. \quad (2.45)$$

В результате получим уравнение, связывающее между собой три переменные в процессе деформации величины ε_{iv} , ε_{iH} и ε_{iB} :

$$\int_0^{\varepsilon_{iH}} \sigma_i d\varepsilon_i + 2 \int_0^{\varepsilon_{iv}} \sigma_i d\varepsilon_i - \int_0^{\varepsilon_{iB}} \sigma_i d\varepsilon_i = 0. \quad (2.46)$$

Уравнение (2.46) идентично уравнению, выведенному в [73] для изотропного материала. Однако, это уравнение является дополнительным необходимым для решения уравнения (2.27), в которое входят показатели анизотропии. То есть функциональная связь между ε_{iv} , ε_{iH} , ε_{iB} зависит от анизотропии.

Подставим в (2.46) функцию упрочнения (2.4). После интегрирования и преобразований получим:

$$(\varepsilon_0 + \varepsilon_{iH})^{n+1} + 2(\varepsilon_0 + \varepsilon_{iv})^{n+1} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{iB})^{n+1} - 2\varepsilon_0^{n+1} = 0. \quad (2.47)$$

Таким образом, принимая одну из переменных ε_{iv} , ε_{iH} или ε_{iB} за независимый аргумент, а две другие за искомые неизвестные, то решая совместно систему двух уравнений (2.27) и (2.47), можно определить функциональные зависимости этих двух неизвестных переменных от той переменной, которую приняли за аргумент. Для этого, однако, следует знать, в каких пределах может изменяться значение этого неизвестного аргумента для данного материала.

Установить возможные пределы значений переменных ε_{iB} и ε_{iv} было бы, по-видимому, весьма трудно без того, чтобы не решить системы уравнений (2.27) и (2.47). Зато установить пределы возможных значений переменной ε_{iH} можно без затруднений для любого материала, что и будет показано в следующем пункте.

Пока же примем переменную ε_{iH} за независимый аргумент, изменяющийся в определенных для данного материала пределах, а переменные ε_{iB} и ε_{iv} рассмотрим как искомые функции аргумента ε_{iH} , значения которых, соответствующие любому значению аргумента (в заданных пределах), могут быть получены в результате совместного решения

системы уравнений (2.27) и (2.47). В этом случае можно составить таблицу значений ε_{iv} , ε_{iH} , ε_{iB} и, пользуясь ею, определить любую возможную для данного материала комбинацию значений этих величин.

Покажем, что для любой такой комбинации можно вычислить значения отношений $\frac{r_B}{S_0}$, $\frac{r_H}{S_0}$, $\frac{\rho_0}{S_0}$, $\frac{\rho_H}{S_0}$ и $\frac{S}{S_0}$. Из равенств (2.19), (2.21), (2.24) получаем:

$$r_H = \rho_0 e^{\frac{1}{\beta} \varepsilon_{iH}}; r_B = \rho_0 e^{-\frac{1}{\beta} \varepsilon_{iB}}; \rho_H = \rho_0 e^{-\frac{1}{\beta} \varepsilon_{iv}}. \quad (2.48)$$

Далее заметим, что при обозначении (2.31) равенство (2.11) может быть приведено к виду:

$$0,5(r_H^2 - r_B^2) = \rho_0 S_0. \quad (2.49)$$

После подстановки в левую часть этого равенства выражений (2.45) и алгебраических сокращений имеем:

$$\frac{\rho_0}{S_0} = \frac{2}{e^{\frac{2}{\beta} \varepsilon_{iH}} - e^{-\frac{2}{\beta} \varepsilon_{iB}}}. \quad (2.50)$$

Принимая во внимание равенство (2.50), можно привести равенство (2.48) к виду:

$$\frac{r_H}{S_0} = \frac{2e^{\frac{1}{\beta} \varepsilon_{iH}}}{e^{\frac{2}{\beta} \varepsilon_{iH}} - e^{-\frac{2}{\beta} \varepsilon_{iB}}}, \quad (2.51)$$

$$\frac{r_B}{S_0} = \frac{2e^{-\frac{1}{\beta} \varepsilon_{iB}}}{e^{\frac{2}{\beta} \varepsilon_{iH}} - e^{-\frac{2}{\beta} \varepsilon_{iB}}}, \quad (2.52)$$

$$\frac{\rho_H}{S_0} = \frac{2e^{-\frac{1}{\beta} \varepsilon_{iv}}}{e^{\frac{2}{\beta} \varepsilon_{iH}} - e^{-\frac{2}{\beta} \varepsilon_{iB}}}. \quad (2.53)$$

Вычитая почленно равенство (2.51) из равенства (2.52) с учетом (2.12), получаем после несложных алгебраических преобразований:

$$\frac{S}{S_0} = \frac{2}{e^{\frac{1}{\beta} \varepsilon_{iH}} + e^{-\frac{1}{\beta} \varepsilon_{iB}}}. \quad (2.54)$$

2.4 Предельные деформационные возможности материала при гибке анизотропной заготовки

Круговой изгиб листа возможен до тех пор, пока не начнут появляться на его поверхности трещины разрушения. Опыт показывает, что трещины всегда появляются на наружной (выпуклой) поверхности изгибаемого листа.

Определим критическую интенсивность деформации $\varepsilon_{ин}^{кр}$ на наружной поверхности, при которой начинается локализация деформации и последующее разрушение. Для этого воспользуемся подходом к оценке устойчивости процессов формообразования листовых материалов, предложенным А.Д. Томлёновым [75].

Элемент бесконечно малой толщины, находящийся на наружной (выпуклой) поверхности изгибаемой листовой заготовки, деформируется в условиях плоского напряженного ($\sigma_r = 0$) и плоского деформированного ($\varepsilon_z = 0$) состояния (рисунок 2.2).

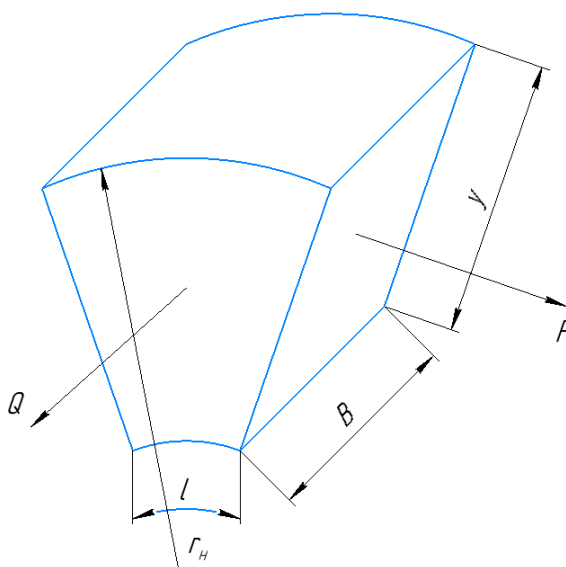


Рисунок 2.2 – Схема к определению критической интенсивности деформации при гибке

Обозначим через P усилие, приложенное к элементу и направленное в тангенциальном направлении, а через Q – усилие, действующее вдоль ребра гiba. Тогда нагрузки P и Q на элемент равны:

$$\begin{aligned} P &= \sigma_{\theta} B y, \\ Q &= \sigma_z l y. \end{aligned} \quad (2.55)$$

В процессе гибки эти усилия будут возрастать из-за деформационного упрочнения и уменьшаться из-за сокращения размеров элемента. В этом случае потеря устойчивости определяется максимумом деформирующих усилий:

$$\begin{cases} dP = d\sigma_{\theta} B y + \sigma_{\theta} dB y + \sigma_{\theta} B dy > 0, \\ dQ = d\sigma_z l y + \sigma_z dl y + \sigma_z l dy > 0. \end{cases} \quad (2.56)$$

Учитывая, что $\frac{dB}{B} = d\varepsilon_z$, $\frac{dl}{l} = d\varepsilon_{\theta}$ и $\frac{dy}{y} = d\varepsilon_r$, после несложных преобразований уравнений (2.56) получим:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_{\theta}}{\sigma_{\theta}} + d\varepsilon_z + d\varepsilon_r > 0, \\ \frac{d\sigma_z}{\sigma_z} + d\varepsilon_{\theta} + d\varepsilon_r > 0. \end{cases} \quad (2.57)$$

Так как $\sigma_{\theta} > \sigma_z$, то есть элемент потеряет устойчивость при нарушении первого неравенства (2.57), и ширина элемента не изменяется ($d\varepsilon_z = 0$, $d\varepsilon_r = -d\varepsilon_{\theta}$), то окончательно получим условие устойчивости для процесса кругового изгиба:

$$\frac{d\sigma_{\theta}}{\sigma_{\theta}} > d\varepsilon_{\theta}. \quad (2.58)$$

Подставляя в уравнение (2.58) критерий пластичности (2.1) и выражение (2.10), получим:

$$\frac{d\sigma_i}{\sigma_i d\varepsilon_i} > \frac{1}{\beta}. \quad (2.59)$$

Дифференцируя функцию упрочнения (2.4), найдём:

$$\frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = An(\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^{n-1} = \frac{n}{\varepsilon_0 + \varepsilon_i} \sigma_i. \quad (2.60)$$

Подставляя уравнение (2.60) в (2.59), определим наибольшие значения величины устойчивости интенсивности деформаций, которая может быть достигнута на наружной поверхности при круговом изгибе:

$$\varepsilon_{iH}^{кр} = \beta n - \varepsilon_0. \quad (2.61)$$

Как видно из полученного уравнения, предельная деформация, а значит и минимальный радиус гибки, зависят от пластической анизотропии и параметров упрочнения заготовки.

Таким образом, допустимые значения ε_{iH} ограничены пределами $0 < \varepsilon_{iH} < \varepsilon_{iH}^{кр}$, что позволяет нам использовать ε_{iH} как независимый аргумент для составления таблицы значений $\varepsilon_{iB}, \varepsilon_{iV}$, а по ним проводить расчеты $\frac{r_B}{S_0}, \frac{r_H}{S_0}, \frac{\rho_0}{S_0}, \frac{\rho_H}{S_0}$ и $\frac{S}{S_0}$.

2.5 Упругое пружинение при гибке

Для определения величины упругой отдачи листовой заготовки после гибки необходимо иметь значение изгибающего момента необходимого для осуществления пластического изгиба. Величину изгибающего момента можно определить как сумму моментов, создаваемых напряжениями σ_θ [30]:

$$M_{и} = B \int_{r_B}^{r_H} \sigma_\theta (r - \rho_H) dr. \quad (2.62)$$

Распишем интеграл в правой части уравнения (2.62):

$$\int_{r_B}^{r_H} \sigma_\theta (r - \rho_H) dr = \int_{r_B}^{r_H} \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} r dr + \int_{r_B}^{r_H} \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} r dr - \rho_H \int_{r_B}^{r_H} \sigma_\theta dr. \quad (2.63)$$

В силу условия равновесия (2.28), а также, что $\sigma_r = 0$ при $r = r_B$ и при $r = r_H$ два последних интеграла в правой части равенства равны нулю. Таким образом, уравнение (2.62) может быть приведено к виду:

$$M_{и} = \frac{B}{2} \int_{r_B}^{r_H} (\sigma_\theta - \sigma_r) r dr, \quad (2.64)$$

откуда получим величину изгибающего момента на единицу ширины заготовки:

$$\frac{2M_{\text{и}}}{B} = \int_{r_{\text{в}}}^{\rho_{\text{н}}} (\sigma_{\theta} - \sigma_r) r dr + \int_{\rho_{\text{н}}}^{\rho_{\text{о}}} (\sigma_{\theta} - \sigma_r) r dr - \rho_{\text{н}} \int_{\rho_{\text{о}}}^{r_{\text{н}}} (\sigma_{\theta} - \sigma_r) r dr. \quad (2.65)$$

Подставляя уравнения (2.48), (2.1), (2.34), (2.35) и (2.50) в равенство (2.65) найдем величину изгибающего момента:

$$\begin{aligned} \frac{M_{\text{и}}}{2Bs_0^2} = & \left(e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{\text{иН}}} - e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_{\text{иВ}}} \right)^{-2} \left[- \int_{\varepsilon_{\text{иВ}}}^{\varepsilon_{\text{иБ}}} \sigma_i e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i + \right. \\ & \left. + \int_0^{\varepsilon_{\text{иВ}}} \sigma_i e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i + \int_0^{\varepsilon_{\text{иН}}} \sigma_i e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i \right]. \end{aligned} \quad (2.66)$$

Используя свойства определенного интеграла, распишем первый интеграл в правой части и окончательно получим:

$$\begin{aligned} \frac{M_{\text{и}}}{2Bs_0^2} = & \left(e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{\text{иН}}} - e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_{\text{иВ}}} \right)^{-2} \left[\int_0^{\varepsilon_{\text{иН}}} \sigma_i e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i + \right. \\ & \left. + 2 \int_0^{\varepsilon_{\text{иВ}}} \sigma_i e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i - \int_0^{\varepsilon_{\text{иБ}}} \sigma_i e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i \right]. \end{aligned} \quad (2.67)$$

Подставим в уравнение (2.67) функцию упрочнения (2.4):

$$\begin{aligned} \frac{M_{\text{и}}}{2Bs_0^2} = & \frac{A}{\left(e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{\text{иН}}} - e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_{\text{иВ}}} \right)^2} \left[\int_0^{\varepsilon_{\text{иН}}} (\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^n e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i + \right. \\ & \left. + 2 \int_0^{\varepsilon_{\text{иВ}}} (\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^n e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i - \int_0^{\varepsilon_{\text{иБ}}} (\varepsilon_0 + \varepsilon_i)^n e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i \right]. \end{aligned} \quad (2.68)$$

Аналитическое интегрирование выражения (2.68) сопряжено с вычислением гамма-функции, поэтому при расчете изгибающего момента по (2.68) целесообразно интегрировать численно. В целом, используя уравнение (2.68) при известных значениях $\varepsilon_{\text{иН}}$, $\varepsilon_{\text{иВ}}$ и $\varepsilon_{\text{иБ}}$ можно рассчитать изгибающий момент, потребный для осуществления пластического изгиба.

Для определения упругой отдачи листового металла после гибки воспользуемся известной зависимостью, связывающей изменение угла изгиба $\Delta\alpha$ при разгрузке с изменением кривизны срединной поверхности заготовки $\rho_{\text{разгр}}$ [30]:

$$\Delta\alpha = \frac{\rho_{\text{ср}}}{\rho_{\text{разгр}}} \alpha, \quad (2.69)$$

где α - угол изгиба, $\Delta\alpha$ – угол пружинения, $\rho_{\text{ср}}$ – радиус срединной поверхности заготовки:

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{r_{\text{н}} + r_{\text{в}}}{2}, \quad (2.70)$$

или с учетом уравнений (2.51) и (2.52):

$$\frac{\rho_{\text{ср}}}{s_0} = \frac{e^{\frac{1}{\beta}\varepsilon_{\text{ин}}} + e^{-\frac{1}{\beta}\varepsilon_{\text{иб}}}}{e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_{\text{ин}}} - e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_{\text{иб}}}}. \quad (2.71)$$

Так как разгрузка происходит в условиях упругого деформирования, то изменение кривизны, возникающее при разгрузке, может быть определено по известной формуле [76]:

$$\frac{1}{\rho_{\text{разгр}}} = \frac{M_{\text{н}}(1 - \vartheta^2)}{EJ}, \quad (2.72)$$

где ϑ – коэффициент Пуассона материала заготовки; J – момент инерции площади поперечного сечения прямоугольной полосы относительно срединной поверхности:

$$J = \frac{Bs^3}{12}. \quad (2.73)$$

После подстановки в уравнение (2.69) выражений (2.72), (2.73) и преобразований можно записать:

$$\Delta\alpha = 24 \frac{1 - \vartheta^2}{E} \frac{M_{\text{н}}}{2Bs_0^2} \frac{\rho_{\text{ср}} s_0^3}{s_0 s^3} \alpha. \quad (2.74)$$

Как видно из полученного выражения, угол пружинения зависит от упругих и пластических свойств материала заготовки, в том числе их

анизотропии, угла и радиуса изгиба, а также от изменения толщины в процессе гибки.

Подставляя в (2.74) уравнения (2.68), (2.71) и (2.54), окончательно получим выражение для расчета угла пружинения:

$$\Delta\alpha = 3A \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{e^{\frac{1}{\beta}\varepsilon_{iH}} + e^{-\frac{1}{\beta}\varepsilon_{iB}}}{\left(e^{\frac{1}{\beta}\varepsilon_{iH}} - e^{-\frac{1}{\beta}\varepsilon_{iB}}\right)^3} \left[\int_0^{\varepsilon_{iH}} (\varepsilon_o + \varepsilon_i)^n e^{\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i + \right. \\ \left. + 2 \int_0^{\varepsilon_{iv}} (\varepsilon_o + \varepsilon_i)^n e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i - \int_0^{\varepsilon_{iB}} (\varepsilon_o + \varepsilon_i)^n e^{-\frac{2}{\beta}\varepsilon_i} d\varepsilon_i \right]. \quad (2.75)$$

Уравнение (2.78) позволяет проводить расчеты упругого пружинения анизотропной упрочняющейся заготовки с учетом ее утонения при изгибе.

2.6 Анализ процесса гибки с учетом упрочнения, анизотропии и утонения заготовки

2.6.1 Взаимосвязь механических характеристик, анизотропии и предельных деформаций

Разработанная математическая модель процесса кругового изгиба позволяет учесть деформационное упрочнение и пластическую анизотропию свойств заготовки, которые входят в полученные уравнения в виде параметров закона упрочнения и коэффициента Лоде. В дальнейшем при анализе процесса гибки будут использоваться именно эти факторы. Однако, в свою очередь, они зависят от механических свойств и показателей анизотропии. В связи с этим, установим качественную и количественную взаимосвязь между параметрами закона упрочнения, коэффициентом Лоде и механическими свойствами и показателями анизотропии.

На рисунке 2.3 приведены результаты расчетов параметров закона упрочнения (2.4) по формулам (2.5) для различных комбинаций механических свойств. Диапазоны изменения предела текучести, предела

прочности и относительного удлинения соответствуют материалам, рассмотренным на рисунке 1.3.

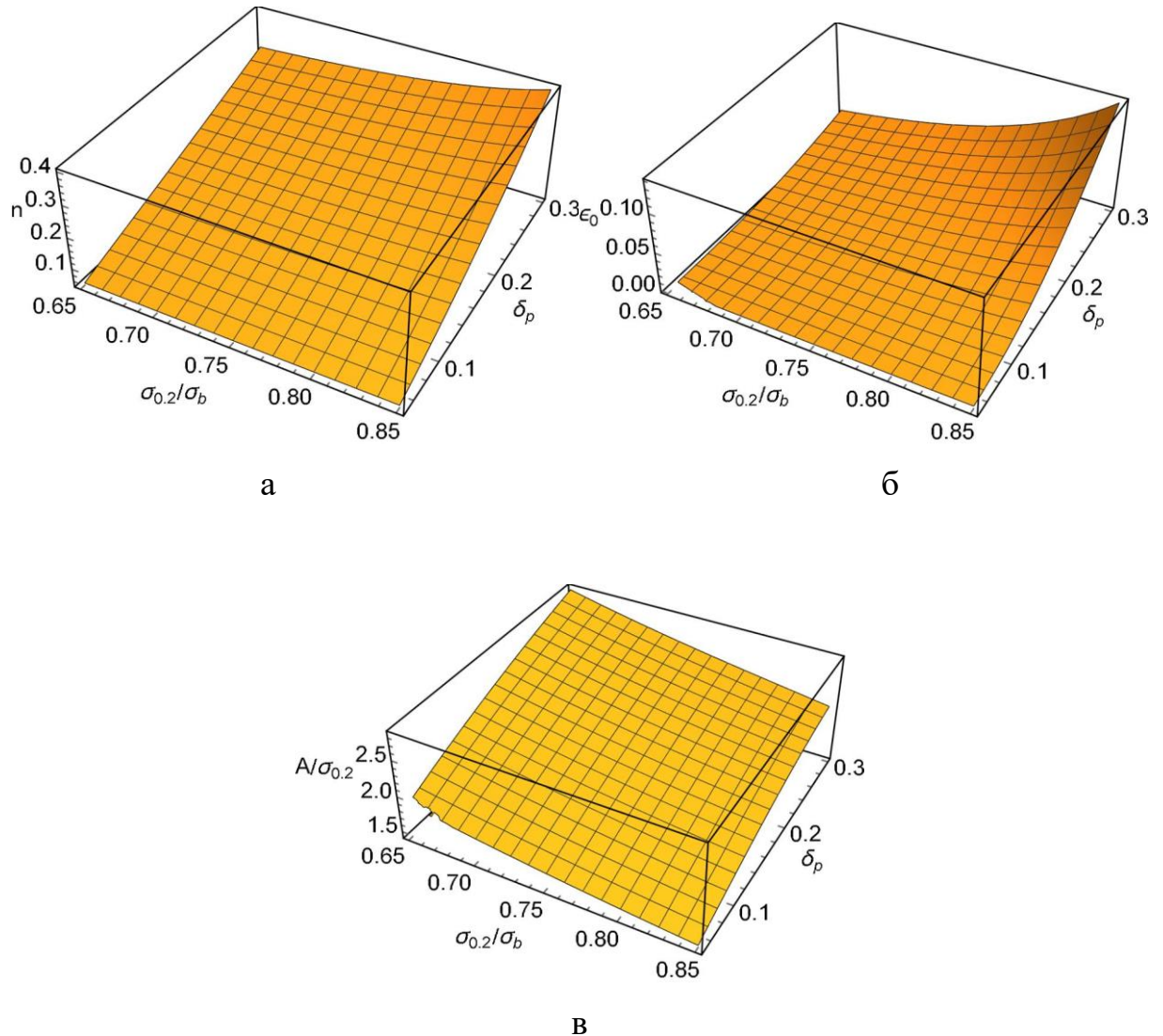


Рисунок 2.3 – Зависимость параметров закона упрочнения от механических свойств

С увеличением отношения предела текучести к пределу прочности и относительного равномерного удлинения наблюдается увеличение показателя упрочнения n и степени упругой деформации ϵ_0 , при которой достигается предел текучести. При этом δ_p оказывает более значительное влияние на увеличение этих факторов чем $\sigma_{0.2}/\sigma_b$. Влияние механических свойств на коэффициент упрочнения A отличается. Если увеличение

относительного удлинения также приводит к росту A , то с увеличением отношения предела текучести к пределу прочности A снижается.

На рисунке 2.4 приведены результаты расчетов коэффициента Лоде по формулам (2.2) и (2.3). Диапазоны изменения показателей анизотропии соответствуют материалам, рассмотренным на рисунке 1.4. Установлено, что в случае расположения ребра гиба параллельно направлению прокатки коэффициент Лоде растет с увеличением μ_{12} и уменьшением μ_{21} . В случае же расположения ребра гиба перпендикулярно направлению прокатки коэффициент Лоде растет как с увеличением μ_{12} , так и μ_{21} . При этом значения коэффициентов Лоде анизотропного материала могут быть как больше, так и меньше значения, соответствующего изотропному материалу (1,15). Значения коэффициентов Лоде β_{\perp} и β_{\parallel} совпадают при $\mu_{12} = \mu_{21}$. То есть для трансверсально-изотропного материала расположение ребра гиба относительно направления прокатки может быть любым.

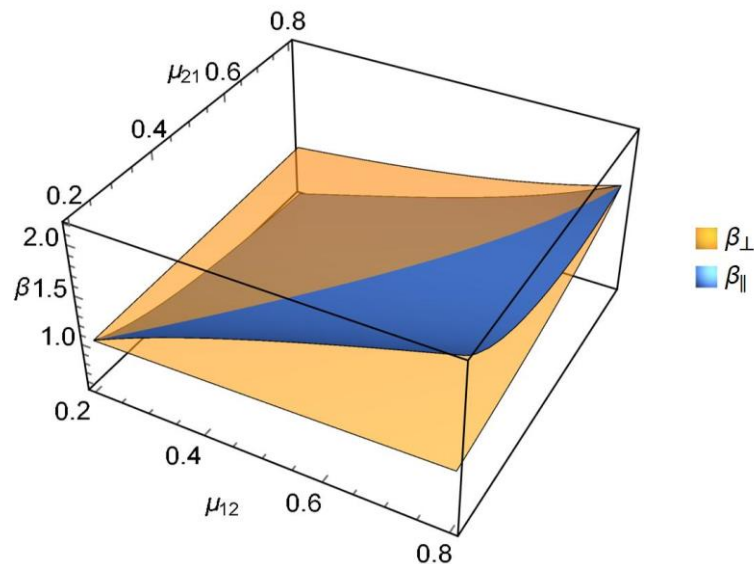


Рисунок 2.4 – Зависимость коэффициента Лоде от показателей анизотропии

На рисунке 2.5 приведены результаты расчетов критической интенсивности деформаций на наружной (выпуклой) поверхности, при которой начинается потеря устойчивости, в зависимости от механических

свойств и коэффициента Лоде. Расчеты производились по формулам (2.5) и (2.61).

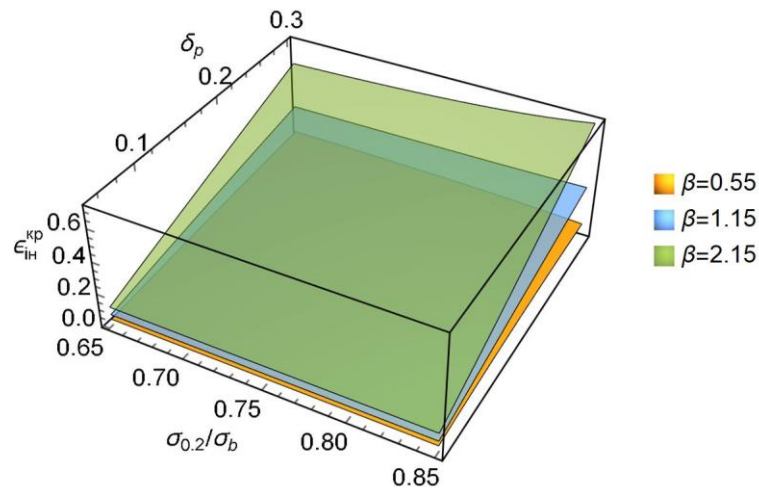


Рисунок 2.5 – Зависимость критической интенсивности деформации на наружной поверхности при гибке от механических свойств и их анизотропии

С увеличением отношения предела текучести к пределу прочности, относительного равномерного удлинения и коэффициента Лоде наблюдается увеличение $\varepsilon_{ин}^{кр}$, 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 $\sigma_{0,2}/\sigma_v$. В зависимости от значения коэффициента Лоде, то есть от величины показателей анизотропии, критическая интенсивность деформаций может быть как больше, так и меньше значения, соответствующего изотропному материалу.

2.6.2 Пример расчета процесса гибки заготовки из алюминиевого сплава 8011А

С использованием разработанной математической модели проведем расчет процесса гибки горячекатаной заготовки из алюминиевого сплава

8011А (Al 98,07-98,36%; Si 0,7-0,8%; Fe 0,7-0,8%; Cu 0,03-0,06%; Mn 0,05%; Mg 0,02-0,08%; Cr 0,03%; Zn 0,05%; Ti 0,05%; Be 0,0001% [3]). Все основные параметры процесса $\varepsilon_{iv}, \varepsilon_{in}, \varepsilon_{ib}, \frac{r_n}{s_0}, \frac{\rho_0}{s_0}, \frac{\rho_n}{s_0}$ и $\frac{S}{s_0}$ будем рассматривать как функцию относительного радиуса гйба $\frac{r_B}{s_0}$.

Для определения механических свойств горячекатаной заготовки толщиной 6,0 мм из сплава 8011А были проведены испытания на растяжение образцов, вырезанных вдоль и поперек направления прокатки. Размеры образцов и параметры испытаний соответствовали ГОСТ 11701-84. Для определения показателей анизотропии использовалась методика, приведенная в [8]. Испытания проводились на универсальной испытательной машине TIRAtest 28300. Результаты испытаний, а также расчетов по формулам (2.2), (2.3) и (2.5) приведены в таблице 2.1. Все расчет проводились только для случая, когда ребро гйба перпендикулярно направлению прокатки.

Таблица 2.1 - Механические свойства сплава 8011А

Параметр	Значение
Модуль упругости E , МПа	69 000
Коэффициент Пуассона ν	0,33
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	94,0
Предел прочности σ_b , МПа	116,0
Относительное равномерное удлинение δ_p , %	9,19
Показатели анизотропии	
μ_{21}	0,375
μ_{12}	0,447
Коэффициент Лоде	
β_{\perp}	1,096
β_{\parallel}	1,197
Степень упругой деформации ε_0	0,0035

Коэффициент упрочнения A , МПа	157,6
Показатель упрочнения n	0,091

На основании проведенных расчетов установлено (рисунок 2.6), что интенсивность деформаций возрастает с уменьшением относительного радиуса гiba (при $\frac{r_B}{S_0} \rightarrow \infty \quad \varepsilon_i \rightarrow 0$). При этом интенсивность деформаций на внутренней поверхности (вогнутой) больше, чем на наружной (выпуклой), эта разность увеличивается с уменьшением $\frac{r_B}{S_0}$. Интенсивность деформаций на нейтральной поверхности по напряжениям пренебрежимо мала при $\frac{r_B}{S_0} > 5$, но резко увеличивается при $\frac{r_B}{S_0} < 2$ и становится сопоставимой с деформациями на наружной и внутренней поверхностях.

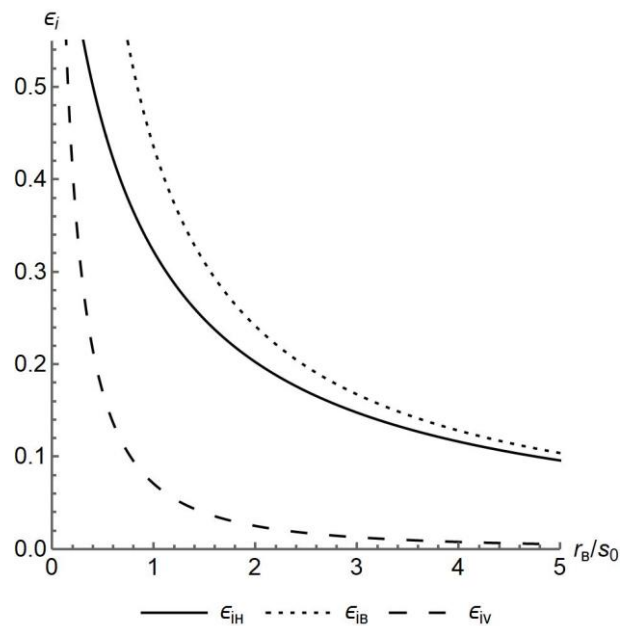


Рисунок 2.6 – Зависимость интенсивности деформации от радиуса гiba заготовки из сплава 8011А

Отметим, что полученные зависимости можно использовать для определения минимального радиуса гибки по значению критической интенсивности деформаций на наружной поверхности.

На рисунке 2.7 приведены результаты расчетов геометрических параметров процесса гибки. Из рисунка 2.7, а видно, что радиуса нейтральных поверхностей по напряжениям и итоговой деформации уменьшаются вместе с $\frac{r_B}{S_0}$. При этом $\frac{\rho_0}{S_0}$ и $\frac{\rho_H}{S_0}$ незначительно отличаются при $\frac{r_B}{S_0} > 5$, но $\frac{\rho_H}{S_0}$ начинает резко уменьшаться при $\frac{r_B}{S_0} < 2$. Таким образом, нейтральная поверхность по напряжениям начинает смещаться к внутренней (вогнутой) поверхности, что приводит к уменьшению толщины заготовки.

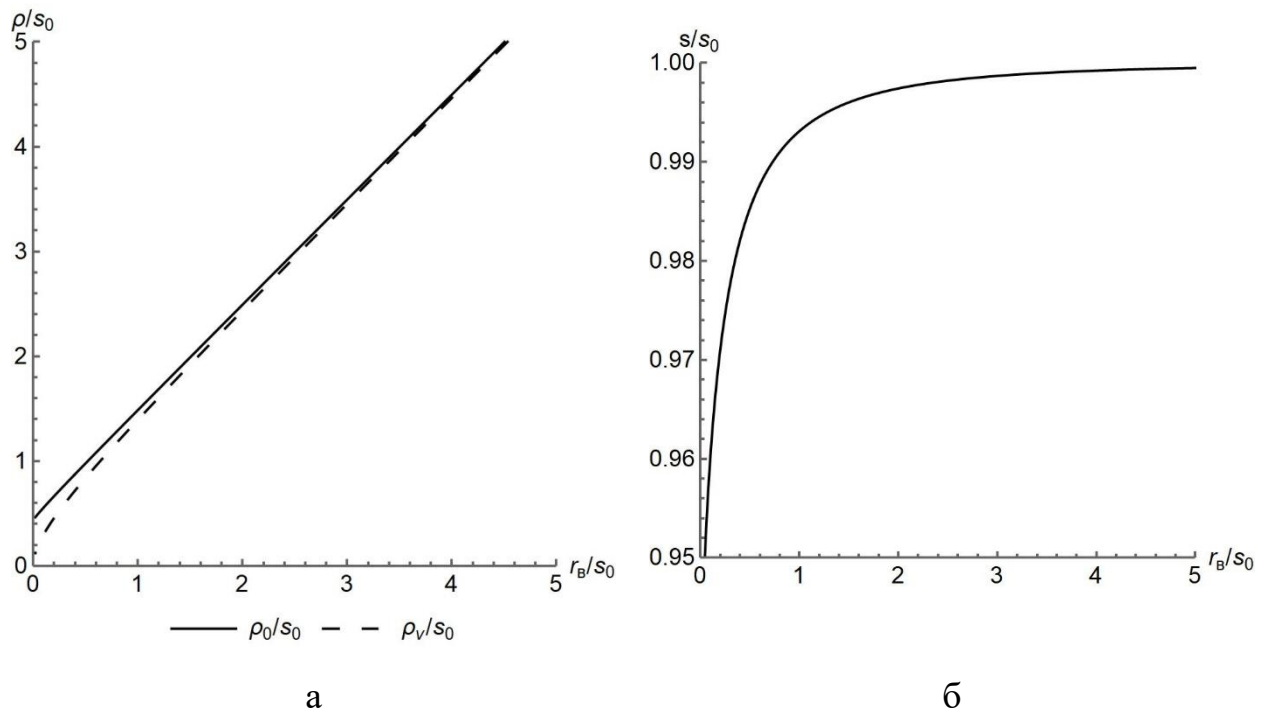


Рисунок 2.7 – Зависимость геометрических параметров процесса гибки заготовки из сплава 8011А от радиуса гiba

Из рисунка 2.7, б видно, что утонение заготовки увеличивается при уменьшении радиуса гибки $\frac{r_B}{S_0}$. При этом утонением можно пренебречь при $\frac{r_B}{S_0} > 5$, но при $\frac{r_B}{S_0} < 2$ утонение составляет уже несколько процентов.

На основании приведенных расчетов установлено (рисунок 2.8, а), что изгибающий момент возрастает с уменьшением относительного радиуса гiba (при $\frac{r_B}{S_0} \rightarrow \infty M_{и} \rightarrow 0$) до момента, когда $\frac{r_B}{S_0} \approx 1$. При дальнейшем уменьшении $\frac{r_B}{S_0}$ наблюдается резкое падение величины изгибающего момента, что можно объяснить уменьшением толщины, которое также начинается в этот момент (рисунок 2.7, б).

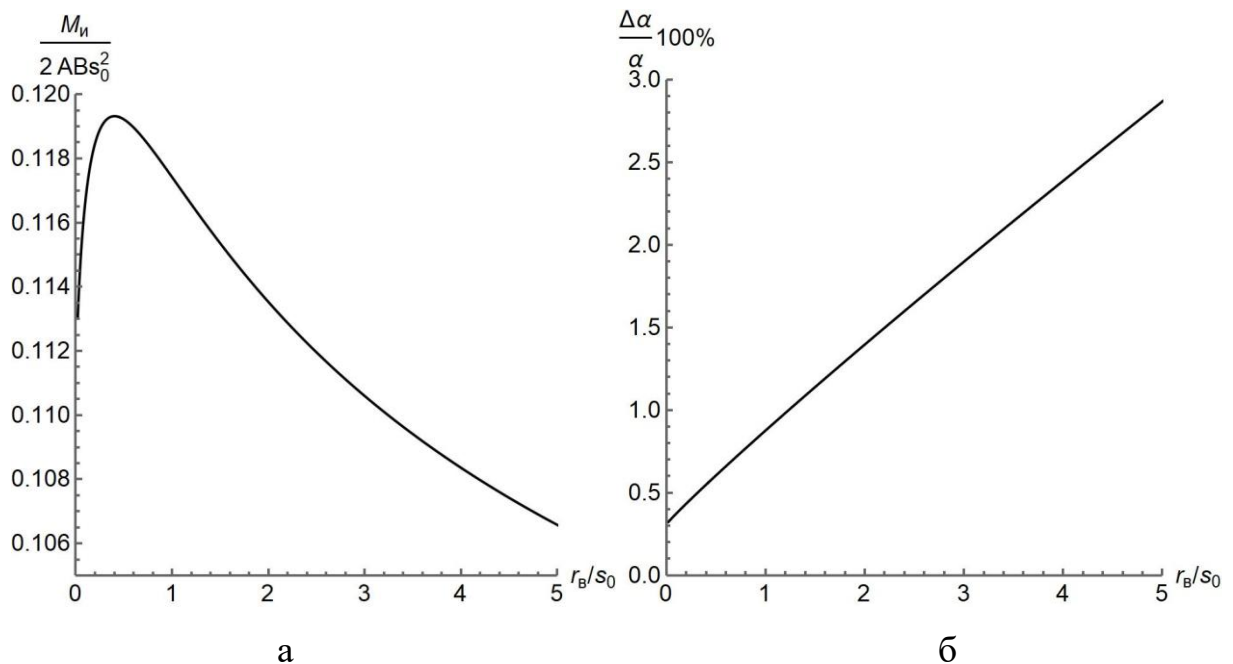


Рисунок 2.8 – Зависимость изгибающего момента (а) и угла пружинения (б) от радиуса гiba заготовки из сплава 8011А

Из рисунка 2.8, б видно, что угол упругого пружинения при снятии нагрузки практически линейно уменьшается при уменьшении радиуса гибки $\frac{r_B}{S_0}$, что связано с увеличением величины пластических деформаций, действующих в сечении.

2.6.3 Влияние упрочнения и анизотропии на процесс гибки

С целью установления закономерностей процесса кругового изгиба и влияния на них деформационного упрочнения и пластической анизотропии свойств листовой заготовки рассмотрим влияние данных факторов по отдельности.

В первом случае в расчетах принималось, что изгибается изотропная заготовка ($\beta \approx 1,15$), показатель упрочнения n которой равен 0 (материал не упрочняется), 0,15 и 0,30. Так как для большинства материалов степень упругой деформации ε_0 , при которой достигается предел текучести, мала (рисунок 2.3, б), то в расчетах было принято, что $\varepsilon_0 = 0$.

Установлено, что упрочнение практически не влияет ни на характер, ни на величину интенсивности деформаций. С увеличением n наблюдается незначительное увеличение интенсивности деформаций (рисунок 2.9).

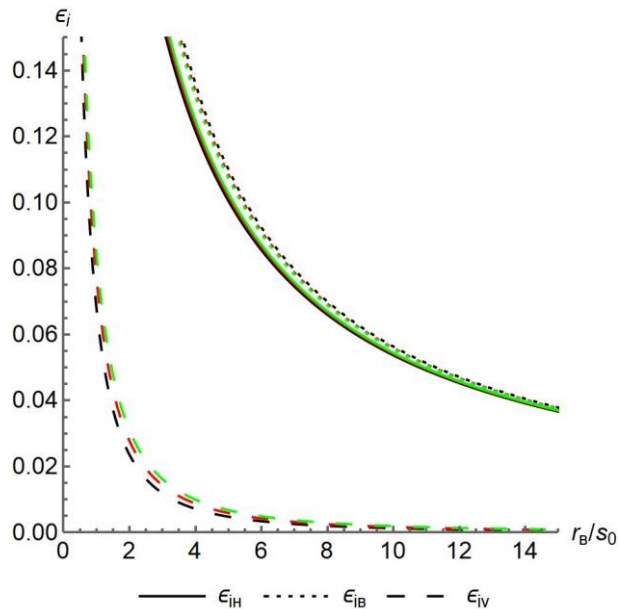


Рисунок 2.9 – Влияние упрочнения на интенсивность деформаций при гибке изотропной заготовки (черный – $n = 0$, красный – $n = 0,15$, зеленый – $n = 0,30$)

На рисунке 2.10 приведены результаты расчетов геометрических параметров процесса гибки. Из рисунка 2.10, а видно, что 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 2.10, б). Таким образом, с увеличением n толщина заготовки уменьшается сильнее чем без упрочнения, но при этом также утонением можно пренебречь при $\frac{r_B}{s_0} > 5$.

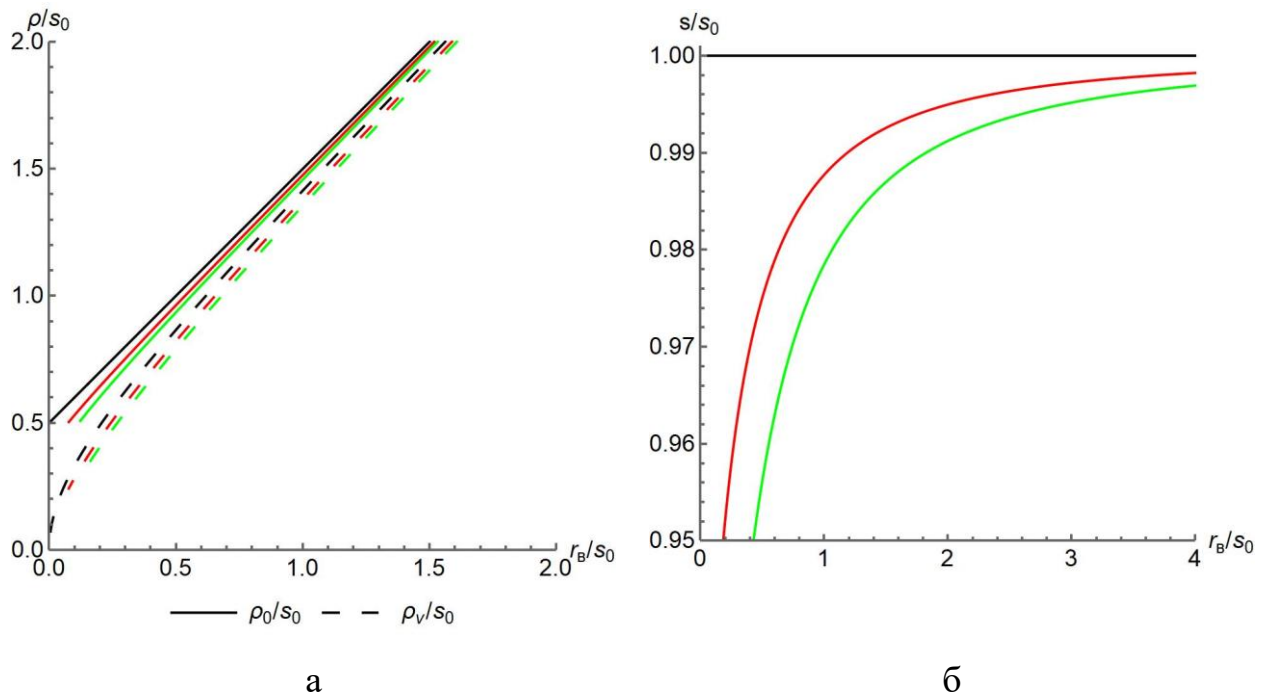


Рисунок 2.10 – Влияние упрочнения на геометрические параметры процесса гибки изотропной заготовки (черный – $n = 0$, красный – $n = 0,15$, зеленый – $n = 0,30$)

Момент, необходимый для пластического изгиба без упрочнения, не изменяется в процессе деформирования, дающего увеличение кривизны (рисунок 2.11, а). При этом величина момента, рассчитанного по разработанной математической модели, равна величине момента,

рассчитанного по известной формуле без учета упрочнения [30]. Очевидно, что упрочнение должно приводить к значительному увеличению изгибающего момента. Однако, согласно рисунку 2.11, а при увеличении показателя упрочнения наблюдается снижение величины изгибающего момента. Это можно объяснить тем, что коэффициент упрочнения A , который в данном случае не учитывается, также является функцией от показателя упрочнения (2.5) и нелинейно возрастает с увеличением n .

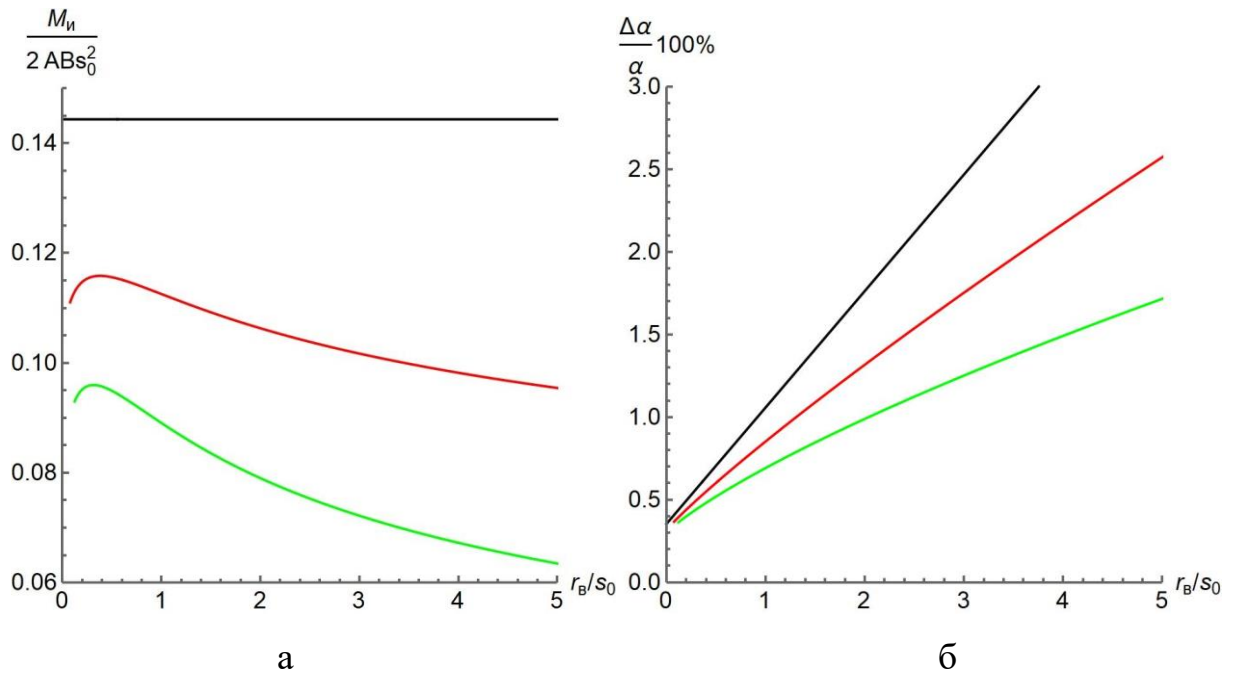


Рисунок 2.11 – Влияние упрочнения на изгибающий момент (а) и угол пружинения (б) при гибке изотропной заготовки (черный – $n = 0$, красный – $n = 0,15$, зеленый – $n = 0,30$)

Из рисунка 2.11, б видно, что угол упругого пружинения при снятии нагрузки уменьшается при увеличении показателя упрочнения, что связано с увеличением напряжений, вызванных пластическими деформациями, по сравнению с величиной напряжений от упругих деформаций.

Во втором случае в расчетах принималось, что изгибается заготовка, коэффициент Лодэ которой равен 0,55, 1,15 (изотропный материал) и 2,15. Также в расчетах было принято, что $\varepsilon_0 = 0$ и $n = 0,15$.

На основании приведенных расчетов установлено (рисунок 2.12-2.13), что интенсивность деформаций, изгибающий момент и угол упругого пружинения возрастают с увеличением коэффициента Лодэ, характер распределения этих параметров не изменяется.

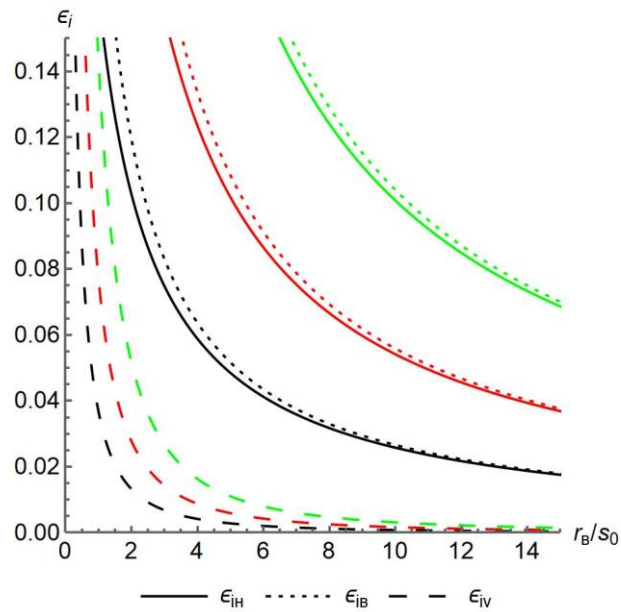


Рисунок 2.12 – Влияние анизотропии на интенсивность деформаций при гибке анизотропной заготовки (черный – $\beta = 0,55$, красный – $\beta = 1,15$, зеленый – $\beta = 2,15$)

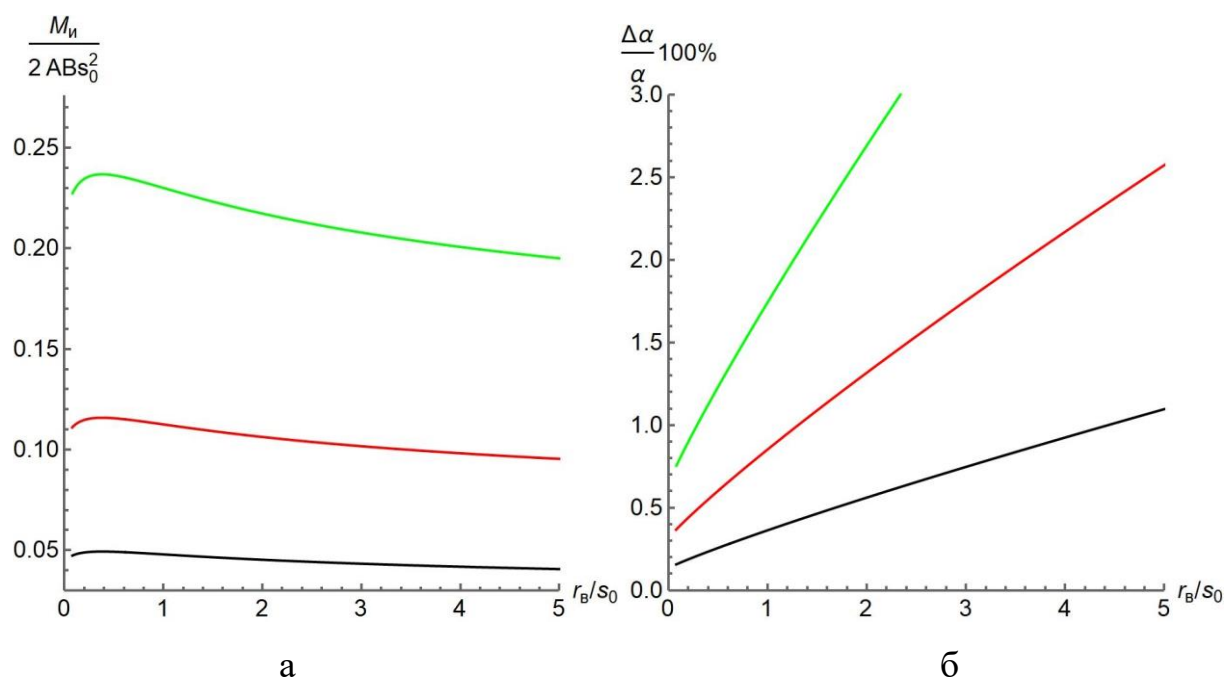


Рисунок 2.13 – Влияние анизотропии на изгибающий момент (а) и угол пружинения (б) при гибке анизотропной заготовки (черный – $\beta = 0,55$, красный – $\beta = 1,15$, зеленый – $\beta = 2,15$)

Кроме того, установлено, что величина коэффициента Лодэ, а значит и пластическая анизотропия не оказывают влияния на геометрические параметры процесса гибки - положение нейтральных поверхностей по напряжениям и итоговой деформации, а также утонение заготовки.

2.7 Экспериментальное исследование деформированного состояния при гибке

С целью верификации разработанных теоретических положений процесса кругового изгиба было проведено экспериментальное исследование распределения деформаций по толщине изгибаемой заготовки.

В качестве деформирующего оборудования использовалась универсальная испытательная машина TIRAtest 28300 с установленными плоскими бойками на сжатие. Скорость перемещения траверсы на испытательной машине задавалась равной 5 мм/мин.

В качестве деформирующего инструмента был спроектирован и изготовлен однооперационный штамп для двухугловой гибки, схема и размеры которого представлены на рисунке 2.14. Штамп обеспечивает гибку на внутренний радиус 18 мм и угол 90° . Рабочие элементы штампа (матрица, пуансон) изготовлены из стали У10. Для того чтобы заготовка деформировалась в условиях, приближенных к плоскому деформированному состоянию, образец крепился к пуансону 3 болтами 6. Испытания проводились без нанесения смазки.

Для анализа деформированного состояния использовалась система бесконтактного измерения деформаций Vic-2D (Correlated Solution Ltd, США), работа которой основана на методике корреляции цифровых изображений [77-79]. По данному методу деформации определяются через перемещения точек поверхности измеряемого объекта во время эксперимента. Для этого используется специально нанесенный на поверхность детали спекл-рисунок (рисунок 2.15). При этом анализируется относительное смещение нанесенных точек в небольших областях по всему изображению. Программное обеспечение вычисляет поле перемещений по всей поверхности объекта, что позволяет точно рассчитать поле деформаций.

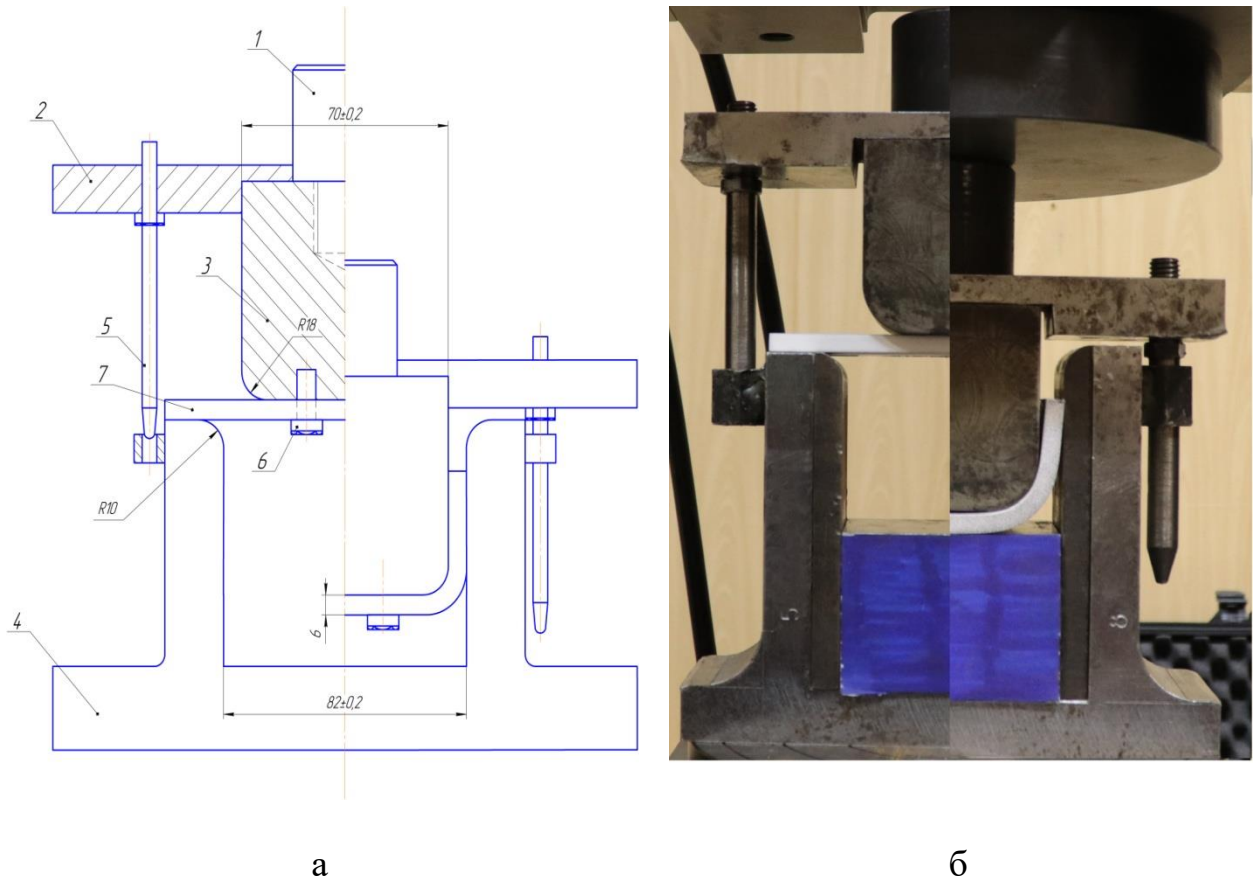


Рисунок 2.14 – Штамповая оснастка(слева - в открытом состоянии, справа - в закрытом): 1 – хвостовик; 2 – верхняя плита; 3 – пуансон; 4 – нижняя плита и матрица; 5 – направляющая колонка; 6 – болт; 7 – заготовка



Рисунок 2.15 - Размеры наносимых точек спекл-рисунка

Общий вид испытательного стенда приведен на рисунке 2.16.



Рисунок 2.16 - Общий вид испытательного стенда

Эксперимент проводился на горячекатаных заготовках из алюминиевого сплава 8011А (свойства приведены в таблице 2.1). Были изготовлены образцы размерами 125x60x6 мм, длинная сторона которых совпадает с направлением прокатки. После чего на один из больших торцов при помощи специальных трафаретов был нанесен спекл-рисунок с размерами точек 0,18 мм (рисунок 2.15). Оптимальный размер точек с учетом погрешности данного метода измерения деформаций установлен в [80].

После проведения испытаний при помощи системы Vic-2D были получены картины распределения тангенциальных и радиальных деформаций, а также интенсивности деформаций (рисунок 2.17). Полученное деформированное состояние полностью соответствует классической теории гибки: вблизи внутреннего радиуса действуют отрицательные тангенциальные деформации, то есть происходит сжатие волокон в этой области, а на внешнем радиусе – положительные, то есть волокна растягиваются. Обратная картина наблюдается для радиальных деформаций.

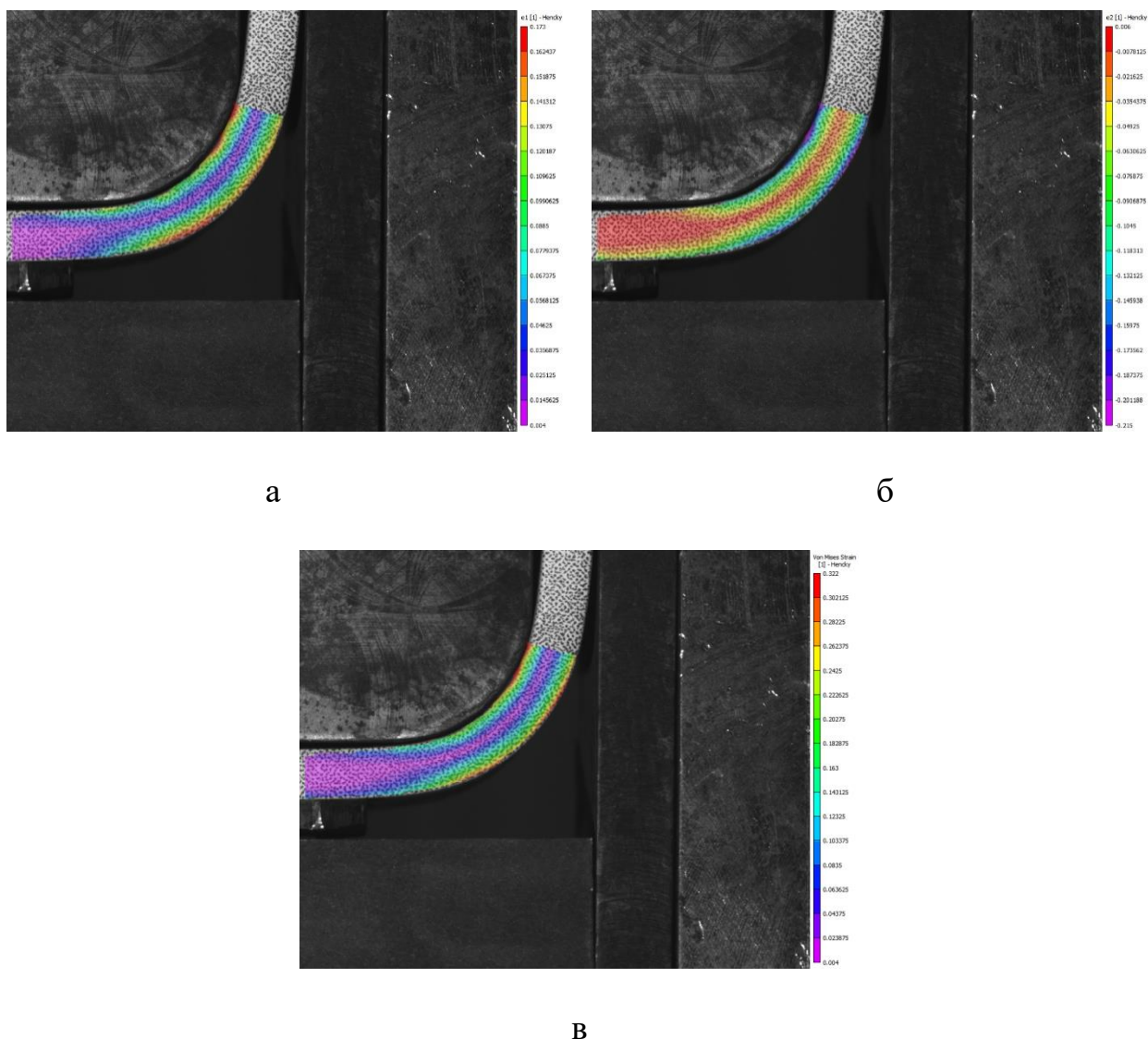


Рисунок 2.17 – Распределение тангенциальной (а) и радиальной (б) деформаций, интенсивности деформаций (в)

На основании полученных экспериментальных данных и результатов расчетов (все параметры приведены в п. 2.6.2) построено распределение деформаций по толщине заготовки при $\frac{r_B}{S_0} = 3$ (рисунок 2.18). Верификация математической модели проводилась путем сравнения величины и распределения деформаций по толщине заготовки, так как определить экспериментальным способом радиус нейтральных слоев по напряжениям или итоговой деформации не представляется возможным из-за недостаточной точности используемой системы.

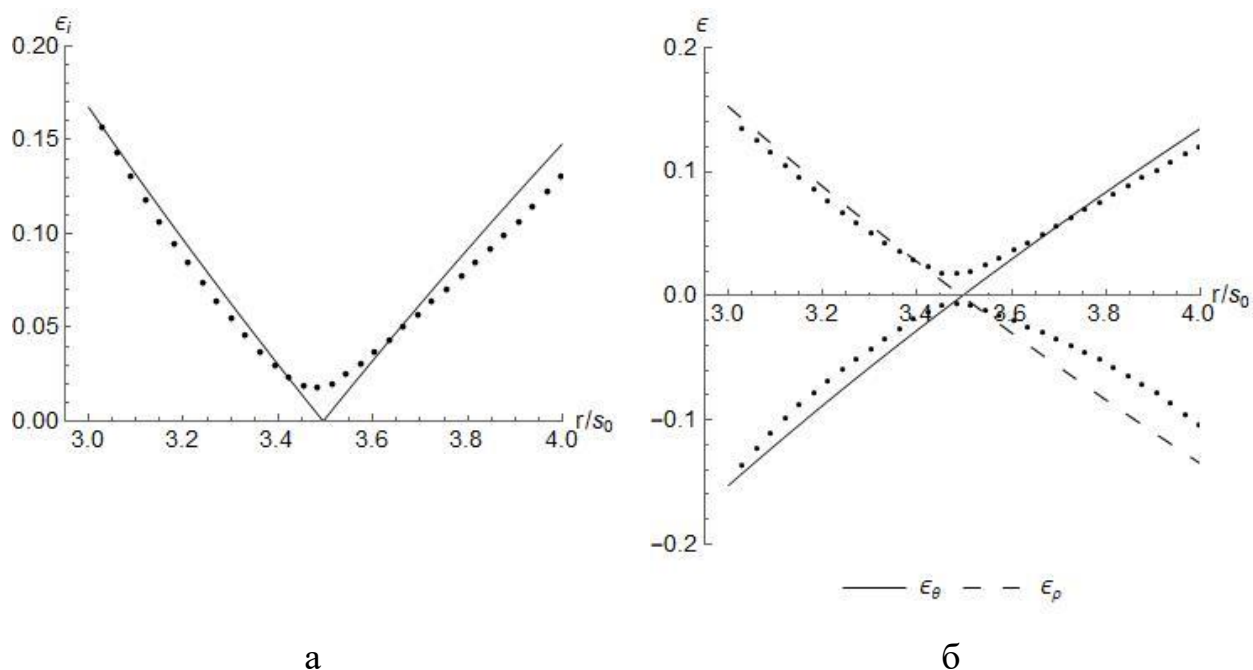


Рисунок 2.18 - Сравнение результатов расчетов (линии) и эксперимента (точки): интенсивность деформаций (а), тангенциальная и радиальная (б) деформации

Как видно из рисунка 2.18, погрешность расчетов по разработанной математической модели составляет не более 5-7%. При этом наибольшее отклонение расчетных и экспериментальных данных наблюдается для радиальных деформаций в зоне растяжения, что можно объяснить невозможностью обеспечения идеальной деформации на торце заготовки при проведении эксперимента.

2.8 Выводы по главе

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 оказывают влияния на геометрические параметры процесса гибки - положение нейтральных поверхностей по напряжениям и итоговой деформации, а также утонение заготовки.

3. Анализ влияния упрочнения и анизотропии заготовки на изгибающий момент показал, что момент, необходимый для пластического изгиба без упрочнения, не изменяется в процессе деформирования, дающего увеличение кривизны. Изгибающий момент возрастает с увеличением коэффициента Лоде.

4. 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 (при $\beta > 1,15$) или меньше (при $\beta < 1,15$), чем изотропной.

5. Установлено, что предельная деформация и минимальный радиус гибки зависят от пластической анизотропии и параметров упрочнения заготовки. С увеличением отношения предела текучести к пределу прочности, относительного равномерного удлинения и коэффициента Лоде наблюдается увеличение $\varepsilon_{iH}^{кр}$, 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 $\sigma_{0,2} / \sigma_g$. В зависимости

от значения коэффициента Лоде, то есть от величины показателей анизотропии, критическая интенсивность деформаций может быть как больше, так и меньше значения, соответствующего изотропному материалу.

3 РАЗРАБОТКА СПОСОБА ДВУХУГЛОВОЙ ГИБКИ С УПРУГИМ ПРИЖИМОМ ЗАГОТОВКИ

3.1 Способ двухугловой гибки с упругими билинейными планками

3.1.1 Описание способа

Для снижения упругого пружинения при двухугловой гибке на угол не более 90° предлагается использовать штамп с упругим прижимом, выполненным в виде упругих планок с двумя прямолинейными участками, один из которых наклонен под углом $\alpha_{пл}$ к оси штампа (рисунок 3.1) [81].

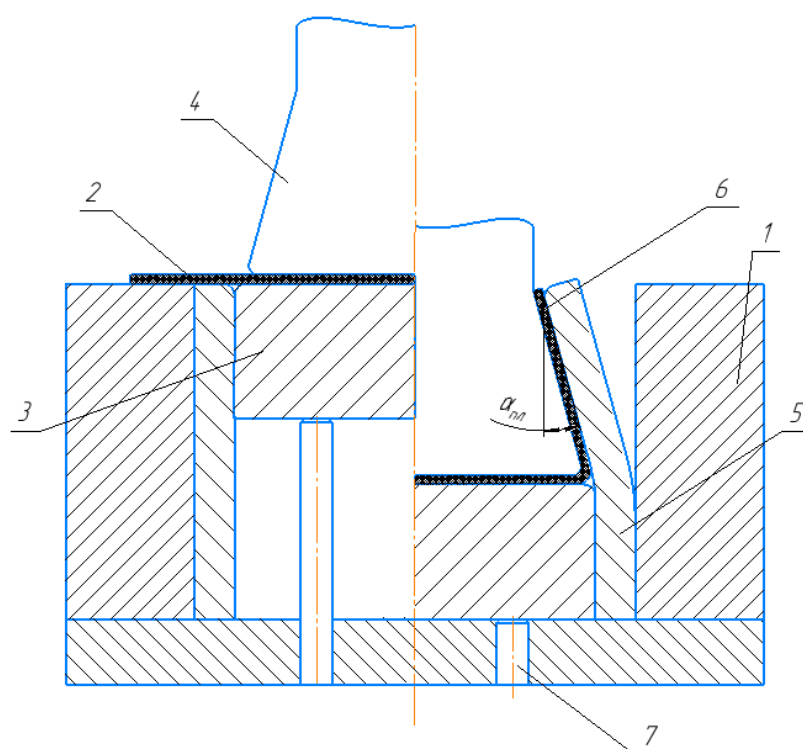


Рисунок 3.1 – Схема процесса двухугловой гибки с использованием упругих билинейных планок (слева начало процесса, справа окончание): 1 – матрица, 2 – заготовка, 3 – выталкиватель, 4 – пуансон, 5 – упругие планки, 6 – деталь, 7 – шпильки

В начале процесса заготовка 2 фиксируется на матрице 1 и выталкивателе 3, который находится в крайнем верхнем положении. При этом 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 полки на детали 6, компенсирующая упругое пружинение. При обратном ходе выталкиватель 3 выводит деталь 6 из матрицы 1, при этом наклонный участок упругой планки 5 выпрямляется выталкивателем. После окончания процесса деталь 6 снимают с пуансона 4 в направлении перпендикулярном плоскости чертежа.

Применение данного способа позволяет: использовать упругие свойства штамповой оснастки; повысить качество детали, снизив упругое пружинение за счет догиба заготовки упругой планкой и формы пуансона; исключить из технологического процесса операцию калибровки.

Для практического применения данного способа необходимо вывести уравнения для расчета основных технологических параметров, определить ограничения процесса и на их основе разработать методику проектирования технологического процесса.

3.1.2 Определение размеров планки

Упругая планка при работе в штамповой оснастке должна догибать заготовку тем самым, компенсируя ее пружинение, и при этом быть достаточно прочной, жесткой и устойчивой. Для этого необходимо подобрать соответствующие геометрические размеры упругой билинейной планки: толщину планки $S_{пл}$, угол наклона прямолинейного участка планки $\alpha_{пл}$,

высоту планки $h_{пл}$, радиус сопряжения прямолинейных участков $R_{пл}$, радиус скругления кромки планки $r_{пл}$ (рисунок 3.2).

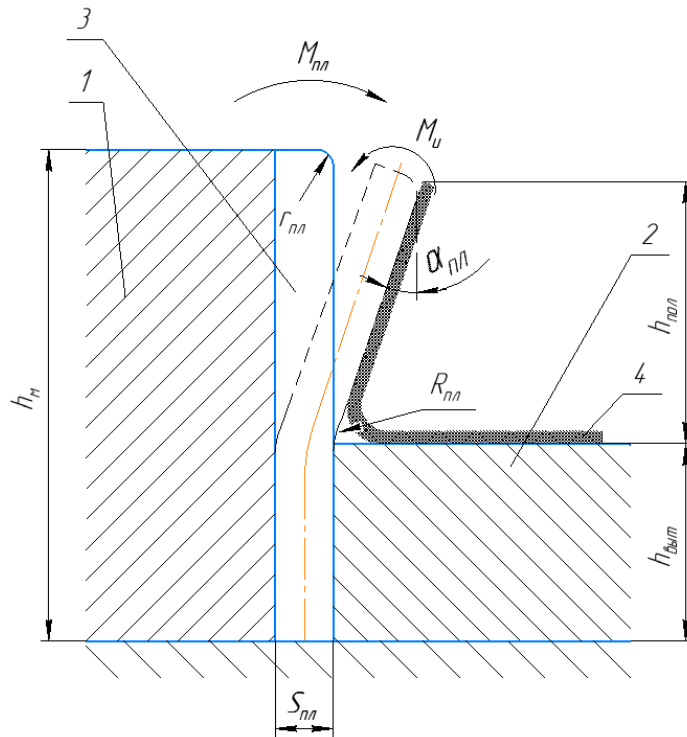


Рисунок 3.2 – Схема к расчету упругой билинейной планки:

1 – матрица, 2 – выталкиватель, 3 – планка, 4 – деталь

Конструктивные решения исполнения планки находятся с помощью теории сопротивления материалов. Для этого введен ряд упрощений и гипотез:

- 1) деформации планки малы по сравнению с ее размерами (гипотеза о малости деформации);
- 2) мысленно проведенные плоские сечения, перпендикулярные к оси планки, в процессе деформирования остаются плоскими и перпендикулярными к оси (гипотеза плоских сечений)
- 3) планка испытывает только упругие деформации, исчезающие после снятия нагрузки;
- 4) свойства материала планки однородны и изотропны;
- 5) упругая планка испытывает изгиб, то есть искривление оси.

Происходящее при изгибе перемещение какой-либо точки оси планки выражается вектором, начало которого совмещено с первоначальным

положением точки, а конец – с положением той же точки в деформированной планке;

б) планка представляется в виде балки, то есть тела, один размер (высота) которого значительно превышает два других размера (толщину и ширину).

Угол наклона одного из прямолинейных участков планки $\alpha_{пл}$ должен включать в себя угол пружинения детали $\Delta\alpha$, а также дополнительный угол $\alpha_{доп}$, который необходим для небольшого перегиба заготовки с целью компенсации вариации свойств заготовки и параметров процесса:

$$\alpha_{пл} = \Delta\alpha + \alpha_{доп}. \quad (3.1)$$

Угол пружинения детали $\Delta\alpha$ рассчитывается по уравнению (2.75). В расчетах $\alpha_{доп}$ следует принимать равным величине допуска на угловой размер детали или определять по результатам конечно-элементного моделирования процесса гибки.

При движении пуансона вниз происходит движение выталкивателя в том же направлении. В крайнем нижнем положении выталкивателя наклонный участок планки освобождается. В этом положении на освобожденный наклонный участок действует внутренний крутящий момент $M_{пл}$, стремящийся вернуть планку в исходное положение и, как следствие, прижимающий ее к заготовке. С другой стороны, упругое пружинение заготовки стремится разогнуть упругую планку моментом равным изгибающему моменту заготовки $M_{и}$. Нижняя часть планки, всегда расположенная между выталкивателем и матрицей, не испытывает нагрузок, поэтому расчеты проводятся лишь для соединяющего прямолинейные участки радиусного перехода $R_{пл}$, с действующими на него моментами (рисунок 3.2).

Таким образом, на стороне планки, обращенной к заготовке, возникают деформации растяжения, а на стороне матрицы – сжатия. Будем считать, что распределение упругих деформаций $\varepsilon_{пл}$ по толщине планки подчиняется линейному закону (рисунок 3.3):

$$\varepsilon_{\text{пл}} = ky, \quad (3.2)$$

где k – коэффициент пропорциональности, y – координата по толщине такая, что:

$$r = \rho'_H + y, \quad (3.3)$$

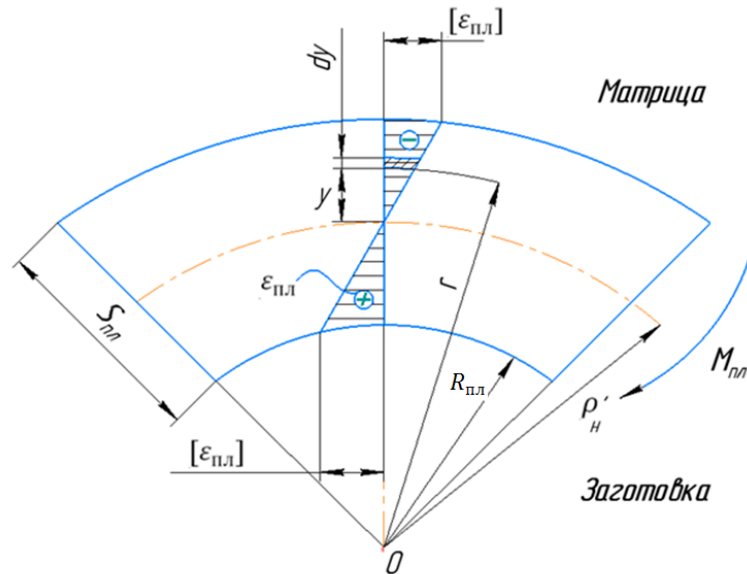


Рисунок 3.3 – Схема изгиба упругой планки для определения ее толщины

ρ'_H – срединная поверхность планки, $\rho'_H = R_{\text{пл}} + \frac{S_{\text{пл}}}{2}$.

Коэффициент k можно определить, приняв, что упругие деформации, действующие на наружной и внутренней поверхности планки, не должны превышать предельной величины упругой деформации, при которой начинается пластическая деформация. Тогда согласно закону Гука с учетом 10% запаса прочности получим:

$$[\varepsilon_{\text{пл}}] = 0,9 \frac{\sigma_{0,2\text{пл}}}{E_{\text{пл}}}, \quad (3.4)$$

где $\sigma_{0,2\text{пл}}$ – предел текучести, $E_{\text{пл}}$ – модуль упругости материала планки.

Тогда из уравнения (3.2) при $y = \frac{S_{\text{пл}}}{2}$ получим:

$$k = \frac{2[\varepsilon_{\text{пл}}]}{S_{\text{пл}}} = 1,8 \frac{\sigma_{0,2\text{пл}}}{S_{\text{пл}}E_{\text{пл}}}. \quad (3.5)$$

Рассмотрим бесконечно малый элемент планки шириной dy , момент внутренних сил которого равен:

$$dM_{\text{пл}} = \sigma_{\text{пл}} B_{\text{пл}} y dy, \quad (3.6)$$

где $\sigma_{пл}$ - упругие напряжения, действующие в тангенциальном направлении, которые определяются по закону Гука:

$$\sigma_{пл} = E_{пл} \varepsilon_{пл}. \quad (3.7)$$

Тогда интегрируя моменты $dM_{пл}$, создаваемые напряжениями $\sigma_{пл}$ для участков dy по толщине заготовки, с учетом (3.2) получим:

$$M_{пл} = kE_{пл}B_{пл} \int_{-\frac{s_{пл}}{2}}^{\frac{s_{пл}}{2}} y^2 dy = kE_{пл} \frac{B_{пл}s_{пл}^3}{12}. \quad (3.8)$$

Окончательно, подставив (3.5) в (3.8), получаем:

$$M_{пл} = 0,15\sigma_{0,2пл} \frac{B_{пл}s_{пл}^2}{6}. \quad (3.9)$$

Предположим, что упругий момент материала планки равен моменту пластического сопротивления материала заготовки: $M_{пл} = M_{и}$. Тогда из (3.9) после преобразований получим формулу для расчета толщины упругой планки:

$$s_{пл} = 2,58 \sqrt{\frac{M_{и}}{\sigma_{0,2пл}B_{пл}}}, \quad (3.10)$$

где $M_{и}$ вычисляется по формуле (2.68).

Таким образом, толщина упругой планки зависит от ширины планки и предела текучести ее материала, а также от механических свойств заготовки, ее толщины, радиусагиба и ширины, на основании которых рассчитывается изгибающий момент для заготовки. При этом модуль упругости материала планки на ее толщину не влияет.

Радиус сопряжения $R_{пл}$ двух прямолинейных участков планки целесообразно назначать, исходя из предельной величины упругой деформации материала планки $[\varepsilon_{пл}]$.

Тогда с учетом принятых допущений, считая, что срединная поверхность радиусного участка планки не меняет свою длину при упругой деформации, запишем величину тангенциальной деформации на стороне планки, обращенной к заготовке:

$$\varepsilon_{пл-з} = \ln \frac{\rho'_н}{R_{пл}} = \ln \frac{R_{пл} + \frac{s_{пл}}{2}}{R_{пл}}. \quad (3.11)$$

Принимая величину тангенциальной деформации $\varepsilon_{\text{пл-з}}$ равной предельной величине упругой деформации $[\varepsilon_{\text{пл}}]$ по уравнению (3.4), получим:

$$R_{\text{пл}} = \frac{S_{\text{пл}}}{2(e^{0,9 \frac{\sigma_{0,2\text{пл}}}{E_{\text{пл}}}} - 1)}. \quad (3.12)$$

Радиус скругления кромки $r_{\text{пл}}$ упругой планки выбирается по справочным данным [32].

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 $h_{\text{выт}}$:

$$h_{\text{пл}} = h_{\text{пол}} + h_{\text{выт}}. \quad (3.13)$$

При гибке П-образных деталей с длинными полками с целью уменьшения величины рабочего хода (например, для штамповки на кривошипном прессе) возможно уменьшение длины наклонного участка планки до половины высоты полки детали. Это возможно только в случае, если к прямолинейности полок не предъявляется высоких требований.

3.2 Способ двухугловой гибки с упругими криволинейными планками

Штамповая оснастка, реализующая способ по пункту 3.1, 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 криволинейных планок, обеспечивающих постоянный прижим полки детали к пуансону при гибке.

3.2.1 Описание способа

Для снижения пружинения при двухугловой гибке на угол не более 90° предлагается использовать штамп с упругим прижимом, выполненным в виде упругой планки, состоящей из двух участков, один из которых криволинейный с радиусом $R_{пл}$, а второй – прямолинейный (рисунок 3.4).

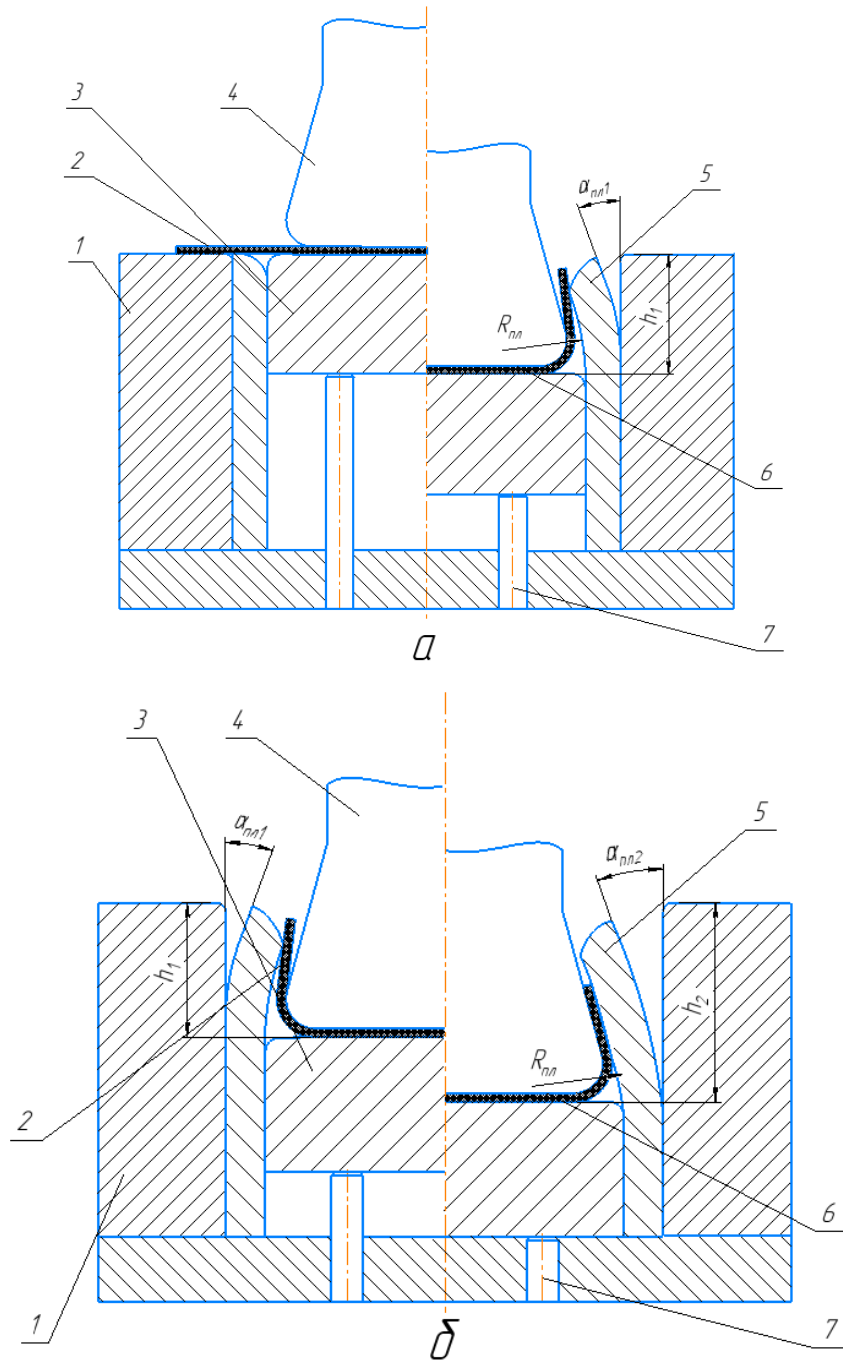


Рисунок 3.4 – Схема процесса двухугловой гибки с упругими криволинейными планками (а – слева начало процесса, справа середина процесса, б – слева середина процесса, справа окончание процесса):

1 – матрица, 2 – заготовка, 3 – выталкиватель, 4 – пуансон, 5 – упругие планки, 6 – деталь, 7 – шпильки

В начале процесса заготовка 2 фиксируется на матрице 1 и выталкивателе 3, который находится в крайнем верхнем положении. При этом 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 , так как упругие планки 5 изготовлены криволинейными с радиусом закругления $R_{пл}$ и их освобождение от заневоливания между выталкивателем 3 и матрицей 1 постепенно возвращает планки в исходное положение. 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.

При обратном ходе выталкиватель 3 выводит деталь 6 из матрицы 1, при этом упругие криволинейные планки 5 постепенно выпрямляются и возвращаются в исходное положение. После окончания процесса деталь 6 снимают с пуансона 4 в направлении перпендикулярном плоскости чертежа.

Криволинейные планки в отличие от билинейных позволяют регулировать угол догиба $\alpha_{пл}$ за счет изменения хода пуансона. 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. При изменении свойств заготовки или при необходимости изменения материала или толщины заготовки процесс

можно снова отладить, не переделывая штамповую оснастку, а только изменяя ход пуансона.

3.2.2 Определение размеров планки

Основными геометрическими размерами упругой криволинейной планки являются: толщина упругой планки $S_{пл}$, радиус закругления упругой планки $R_{пл}$ по внутренней поверхности в свободном состоянии (в крайнем нижнем положении выталкивателя), угол загиба упругой планки $\alpha_{пл}$ при перемещении пуансона h (определяет высоту планки $h_{пл}$), радиус скругления кромки $r_{пл}$.

Для расчета геометрических размеров упругой криволинейной планки будем использовать те же допущения, что и для билинейной. При этом выражения для расчета угла загиба $\alpha_{пл}$, радиуса скругления кромки $r_{пл}$, толщины $S_{пл}$ и радиуса $R_{пл}$ планки будут аналогичны выражениям для билинейной планки (радиус криволинейной планки соответствует радиусу сопряжения прямолинейных участков билинейной планки).

Определим длину рабочей части $l_{a'b}$ криволинейной планки в разогнутом состоянии (рисунок 3.5). Введем угол $\beta_{пл}$, на который опирается дуга длиной $l_{\widehat{ab}}$ и радиусом $R_{пл}$. При этом точка b соответствует точке освобождения планки, а точка a – точке приложения внешней силы от упругой планки к заготовке.

Найдем величину перемещения крайней точки a' упругой планки при ее изгибе $l_{aa'}$. С одной стороны, из прямоугольного треугольника $aa'b$ оно равно:

$$l_{aa'} = l_{ab} \sin \alpha_{пл}, \quad (3.14)$$

где l_{ab} - длина хорды дуги \widehat{ab} . С другой стороны, $l_{aa'}$ можно определить следующим образом:

$$l_{aa'} = l_{b'b} = R_{пл} (1 - \cos \beta_{пл}). \quad (3.15)$$

Приравняв (3.14) и (3.15), после преобразований получим:

$$\cos\beta_{\text{пл}} = 1 - \frac{l_{ab}}{R_{\text{пл}}} \sin\alpha_{\text{пл}}. \quad (3.16)$$

Так как длина хорды равна:

$$l_{ab} = 2R_{\text{пл}} \sin \frac{\beta_{\text{пл}}}{2}, \quad (3.17)$$

то после подстановки (3.17) в (3.16) и несложных тригонометрических преобразований получим:

$$\beta_{\text{пл}} = 2\alpha_{\text{пл}}. \quad (3.18)$$

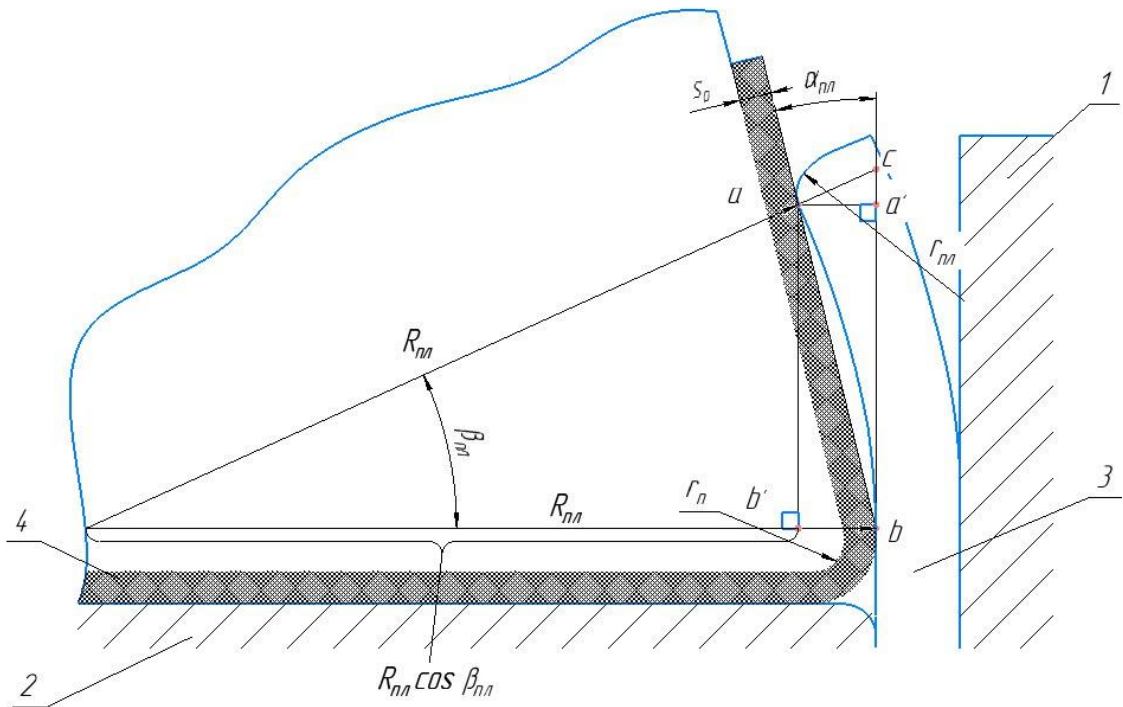


Рисунок 3.5 - Геометрическая схема к определению длины рабочей части криволинейной планки: 1 - матрица, 2 - выталкиватель, 3 - упругая планка, 4 - деталь

Тогда с учетом (3.17) и (3.18) из прямоугольного треугольника $aa'b$ получим выражение для расчета длины рабочей части упругой криволинейной планки:

$$l_{a'b} = R_{\text{пл}} \sin 2\alpha_{\text{пл}}. \quad (3.19)$$

Высоту упругой криволинейной планки найдем следующим образом:

$$h_{\text{пл}} = h_{\text{выт}} + l_{a'b} + r_{\text{пл}} + r_{\text{п}} + s_0. \quad (3.20)$$

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:

$$\alpha_{пл}^{max} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{(5-10)S_0}{R_{пл}}, \quad (3.21)$$

а ход пуансона h , при котором достигается промежуточный угол догиба $\alpha_{пл}$, определим из (3.19) и (3.20):

$$h = R_{пл} \sin 2\alpha_{пл} + r_{пл} + r_{п}. \quad (3.22)$$

3.3 Разновидности разработанных способов для гибки деталей другой формы

Разработанные способы двухугловой гибки с использованием упругих планок (билинейных или криволинейных) могут использоваться и для формообразования деталей формы, отличной от П-образной. Например, на рисунке 3.6 представлена схема гибки V-образной детали на угол не более 90° .

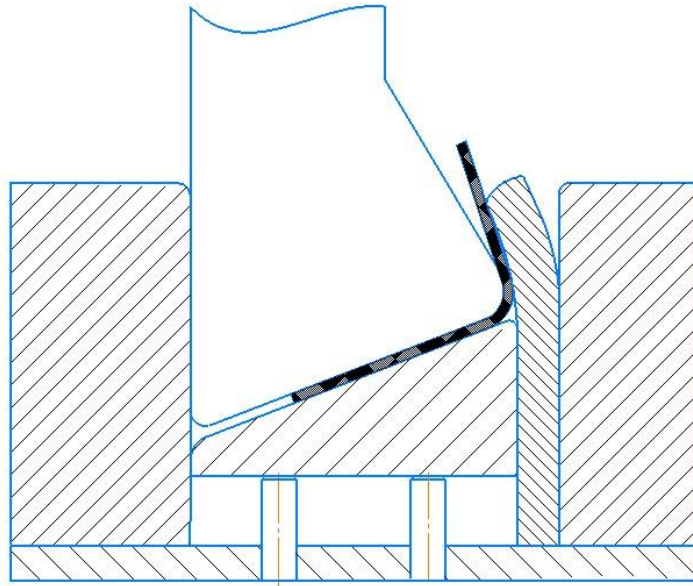


Рисунок 3.6 - Схема гибки V-образной детали с угломгиба не более 90°

Также возможна гибка S-образных деталей, когда гибка первой полки проводится по схеме V-образной детали (рисунок 3.6), а второй полки по схеме на рисунке 3.7.

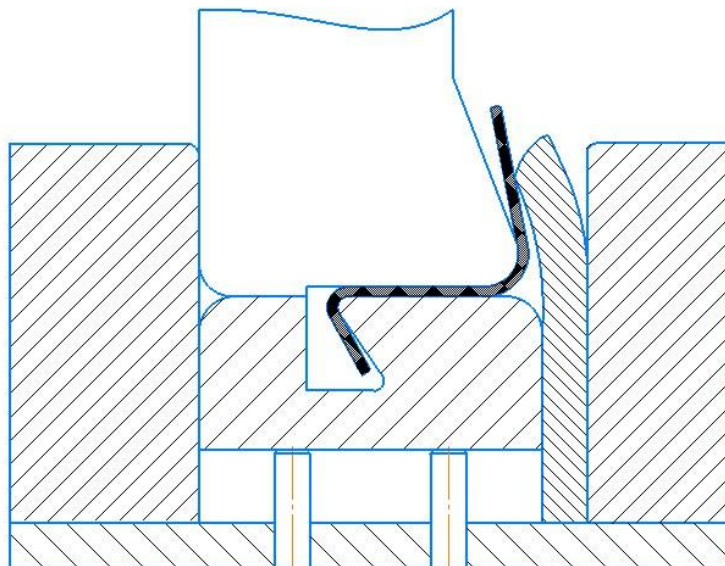


Рисунок 3.7 - Схема гибки S-образной детали

Гибка П-образных деталей, имеющих значительно отличающиеся углыгиба, радиуса закругления и длины полок может быть ограничена

невозможностью согласования геометрических размеров левой и правой упругих планок, а также хода пуансона и угла догиба. В этом случае гибку каждой полки предлагается вести отдельно, при этом для формообразования второй полки можно использовать схему, представленную на рисунке 3.8.

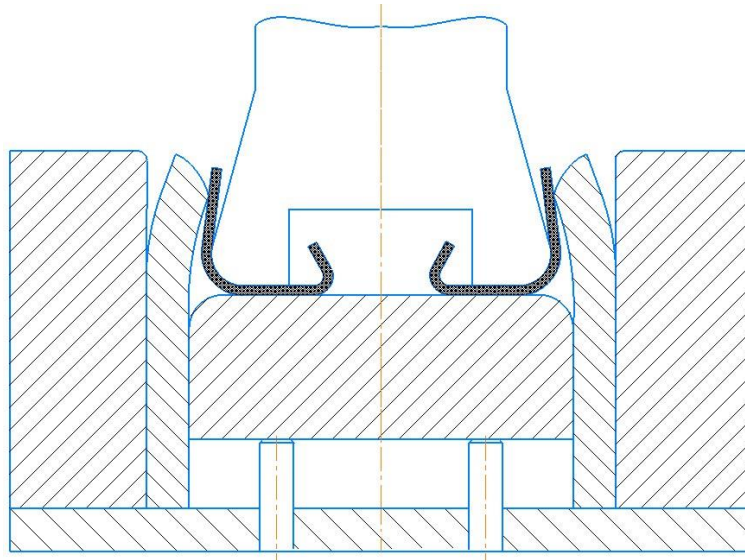


Рисунок 3.8 - Схема гибки двух симметрично расположенных П-образных деталей, размеры которых сильно отличаются

3.4 Анализ геометрических размеров упругих планок

Рассмотрим влияние механических свойств материала упругой планки на такие ее геометрические размеры как радиус $R_{пл}$ и толщина $S_{пл}$.

В предложенных способах двухугловой гибки в конструкции штампов используются упругие элементы, которые в процессе формообразования многократно упруго деформируются. Для сохранения работоспособности таких элементов их необходимо изготавливать из материалов, имеющих высокие значения предельной упругой деформации $[\epsilon_{пл}]$.

На рисунке 3.9 приведено распределение наиболее часто используемых при изготовлении штамповой оснастки материалов в зависимости от их предела текучести и модуля упругости. С учетом формулы (3.4) видно, что к материалам с максимальной предельной упругой деформацией относятся:

инструментальные высокоуглеродистые стали (У7, У8, У10, 6ХВГ), а значит именно из них целесообразно изготавливать упругие элементы.

На рисунке 3.10 представлен график изменения относительного радиуса упругой планки по внутренней поверхности от предела текучести и модуля упругости материала. График показывает, что относительный радиус упругой планки уменьшается с ростом предельного значения упругой деформации, что позволяет сократить высоту упругой криволинейной планки. Согласно рисунку 3.10 и формуле (3.12) изготовить планку с наименьшим радиусом можно из материалов с наибольшим значением предельной упругой деформации – сталей У7, У8, У10, 6ХВГ.

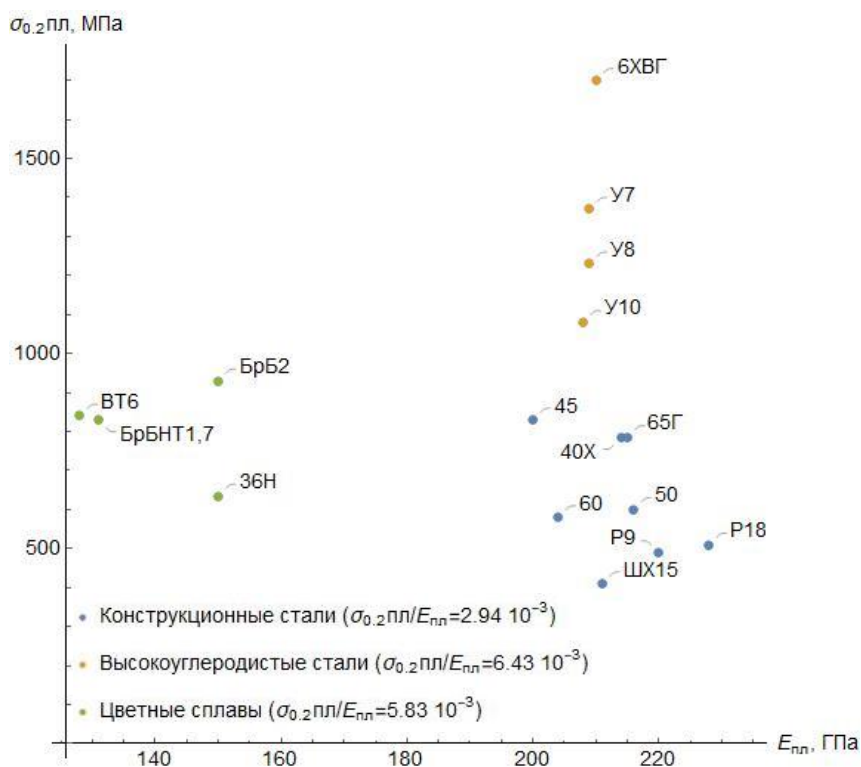


Рисунок 3.9 - Распределение материалов для упругих элементов в зависимости от их предела текучести и модуля упругости (на основании данных из [2])

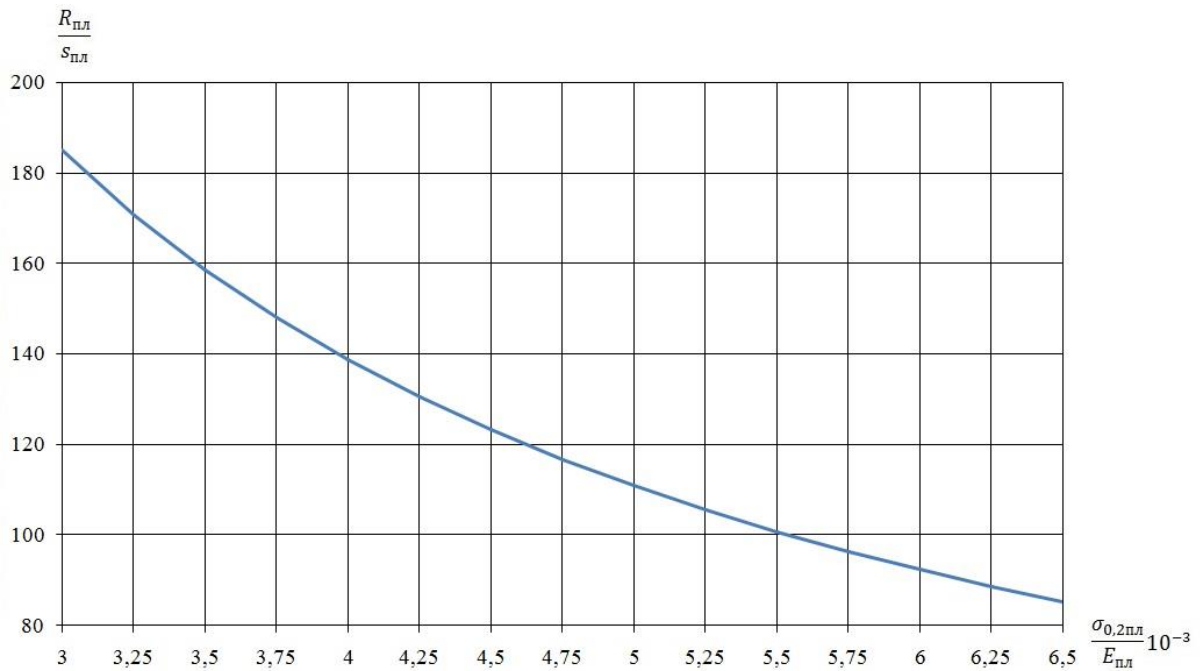


Рисунок 3.10 - Изменение относительного радиуса упругой планки от отношения предела текучести к модулю упругости материала

Определим относительную толщину упругой планки в зависимости от механических свойств материала планки. Для расчетов по формуле (3.10) воспользуемся упрощенной зависимостью изгибающего момента при гибке [30]:

$$M_{и} = \sigma_b \frac{B s_0^2}{4}. \quad (3.23)$$

Тогда, подставив уравнение (3.23) в (3.10), получим:

$$s_{пл} = 1,29 s_0 \sqrt{\frac{\sigma_b}{\sigma_{0,2пл}} \frac{B}{B_{пл}}}. \quad (3.24)$$

На рисунке 3.11 представлены результаты расчетов по уравнению (3.24) (принято, что $B_{пл} = B$). Таким образом, с увеличением предела прочности материала заготовки по отношению к пределу текучести планки ее толщина увеличивается.

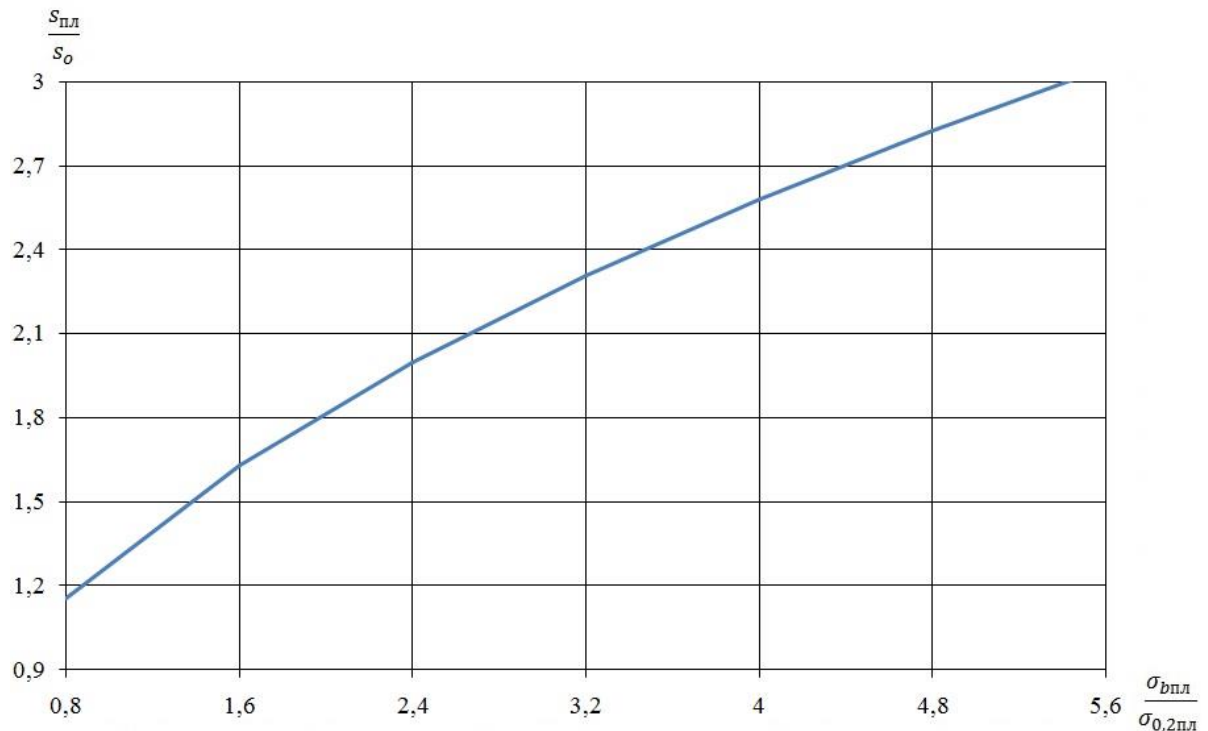


Рисунок 3.11 - Изменение относительной толщины упругой планки от отношения предела прочности заготовки к пределу текучести планки

Таким образом, при прочих равных условиях наименьшая толщина планки соответствует материалам с наибольшим значением предела текучести - сталям У7, У8, У10, 6ХВГ.

В целом, с учетом приведенных расчетов радиуса и толщины упругой планки - оптимальными материалами для ее изготовления являются инструментальные высокоуглеродистые стали (У7, У8, У10, 6ХВГ).

3.5 Методика разработки технологического процесса двухугловой гибки в штампе с упругими прижимами

1. Определение механических характеристик заготовки.

1.1 Для определения механических свойств (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение) заготовки можно воспользоваться справочными данными, которые содержат информацию о свойствах различных материалов. Однако, для более точного определения

механических характеристик плоских заготовок необходимо провести испытания на растяжение по ГОСТ 11701-84 и ГОСТ 1497-84, так как справочные данные могут не учитывать некоторые факторы, влияющие на свойства материала. Испытания на растяжение нужно проводить для образцов, вырезанных вдоль направления прокатки.

Для того чтобы определить коэффициенты поперечной деформации вдоль и поперек направления прокатки μ_{21} и μ_{12} необходимо воспользоваться справочными данными, например, [8]. Для более точного определения коэффициентов анизотропии плоских заготовок необходимо провести испытания на растяжение по ГОСТ 11701-84 и ГОСТ 1497-84 образцов, вырезанных в направлении прокатки и поперечном направлении. Испытания нужно проводить с использованием продольного и поперечного экстензометров, по данным с которых на участке удлинения 5-10% рассчитываются коэффициенты поперечной деформации:

$$\mu = -\frac{e_b}{e_l} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{l_k}{l_0}}, \quad (3.25)$$

где e_b – деформация сжатия в направлении ширины плоского образца, e_l – деформация растяжения в направлении длины образца, b_0, b_k – начальное и конечное значения ширины образца, l_0, l_k – начальное и конечное значения длины образца.

1.2 По полученным механическим свойствам по формуле (2.5) рассчитать параметры закона упрочнения (степень упругой деформации, при которой достигается предел текучести; константы упрочнения) и по формулам (2.2)-(2.3) коэффициент Лоде (в зависимости от расположения ребрагиба относительно направления прокатки).

2. Расчет критической (предельной) деформации.

Критический интенсивность деформации на наружной (выпуклой) поверхности определяется по формуле (2.61).

3. Расчет геометрических параметров процесса гибки.

3.1 Решая систему уравнений (2.27) и (2.47) с граничным условием $\varepsilon_{iB} = 0$ при $\varepsilon_{iH} = 0$, вычисляется функция $\varepsilon_{iB} = f(\varepsilon_{iH})$ и $\varepsilon_{iv} = f(\varepsilon_{iH})$ в диапазоне $0 < \varepsilon_{iH} < \varepsilon_{iH}^{кр}$.

3.2 Пользуясь формулами (2.50)-(2.54) вычисляются значения $\frac{r_H}{s_0}, \frac{\rho_0}{s_0}, \frac{\rho_H}{s_0}$ и $\frac{s}{s_0}$ для заданной геометрии детали радиуса гiba $\frac{r_B}{s_0}$.

4. Расчет размеров заготовки.

Определение размеров плоских заготовок, подлежащих гибке, осуществляется исходя из равенства длины заготовки длине нейтрального слоя ρ_0 по итоговой деформации изогнутой детали. Ширина и толщина заготовки соответствует ширине и толщине детали.

5. Расчет силовых параметров процесса

5.1 По формуле (2.68) определяется величина внешнего изгибающего момента при гибке.

5.2 Усилие для двухугловой гибки рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{2M_{и}}{l_{п}}, \quad (3.26)$$

где $l_{п} = r_B + 1,2s_0$ – длина плеча гибки.

6. Расчет упругого пружинения при гибке.

Угол пружинения определяется по формуле (2.75).

7. Расчет геометрических размеров упругой планки.

7.1 Выбор материала упругой планки.

Для упругой планки рекомендуется выбирать материалы с максимальной предельной упругой деформацией, в частности, инструментальные высокоуглеродистые стали: У7, У8, У10, 6ХВГ (рисунок 3.9).

7.2 Выбор типа упругой планки.

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.

7.3 Для расчета геометрических размеров упругой билинейной планки необходимо воспользоваться формулами: для толщины (3.10), для радиуса сопряжения прямолинейных участков (3.12), для высоты (3.13), для угла наклона (3.1), радиус скругления кромки упругой планки выбирается по справочным данным [32].

7.4 Для расчета геометрических размеров упругой криволинейной планки необходимо воспользоваться формулами: для толщины (3.10), для радиуса сопряжения прямолинейных участков (3.12), для высоты (3.22), для угла наклона (3.1), радиус скругления кромки упругой планки выбирается по справочным данным [32].

На основе приведенной методики разработаны руководяще-технические материалы, содержащие рекомендации по реализации разработанного способа гибки, конструкции штамповой оснастки, режимам гибки, техническим требованиям к изделиям. Руководяще-технические материалы внедрены на ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», что подтверждается актом внедрения (Приложение А).

3.6 Выводы по главе

1. Разработан способ двухугловой гибки П-образных деталей, в котором компенсация пружинения обеспечивается за счет догиба заготовки упругой билинейной или криволинейной планкой и формой пуансона.

2. Получены уравнения, позволяющие определить геометрические размеры упругой планки, такие как угол загиба, радиус, толщина. Расчет угла

загиба планки осуществляется на основании угла пружинения детали. Радиус планки определяется по предельной величине ее упругой деформации. Толщина планки должна обеспечивать требуемое силовое условие для догиба заготовки.

3. 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 высокоуглеродистые стали (У7, У8, У10, 6ХВГ).

4. Разработаны способы двухугловой гибки в штампе с упругими элементами, которые могут использоваться для получения V-образных деталей на угол не более 90° , S-образных деталей и П-образных деталей, углыгиба, радиусы закругления и длины полок которых сильно отличаются.

5. 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.

4 КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СПОСОБА ДВУХУГЛОВОЙ ГИБКИ С УПРУГИМ ПРИЖИМОМ ЗАГОТОВКИ

4.1 Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния упругих планок в процессе гибки

4.1.1 Разработка компьютерной модели двухугловой гибки с упругим прижимом заготовки

Моделирование проводилось в программном комплексе DEFORM. Так как для процесса двухугловой гибки можно принять плоское деформированное состояние (деформации в направлении ширины заготовки отсутствуют), то использовался DEFORM-2D, предназначенный для решения «плоских» задач [82]. Кроме того, использовалась симметрия заготовки и основных элементов оснастки - моделировалась только половина всех объектов с наложением соответствующих граничных условий на узлы заготовки, лежащие на оси симметрии. Это позволило сократить количество конечных элементов и ускорить время расчетов [83-85].

Для построения геометрии заготовки и оснастки использовалась программа КОМПАС, затем геометрия импортировалась в DEFORM. Моделировалось два варианта – гибка в штампе с упругими билинейными планками и с криволинейными планками. Размеры основных элементов штампа приведены на рисунках 4.1-4.2. Конструктивно-технологические расчеты процесса гибки производились по методике, представленной в п. 3.5.

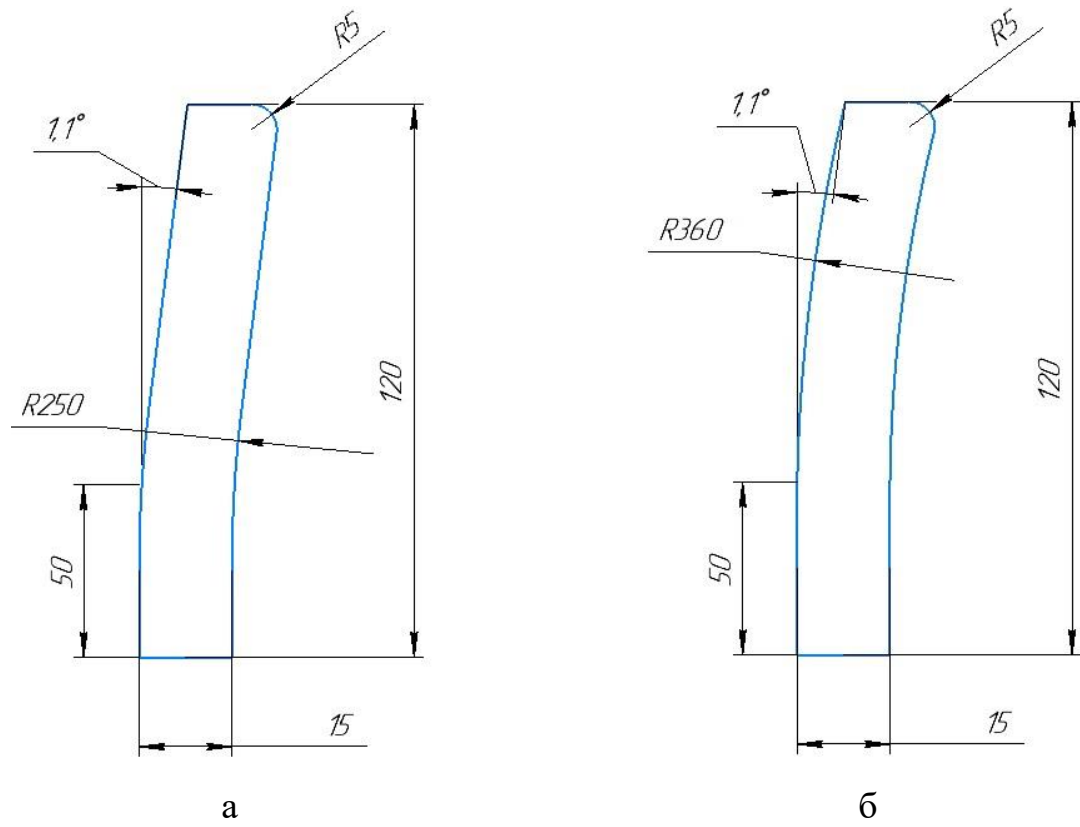


Рисунок 4.1 – Размеры упругой билинейной (а) и криволинейной (б) планки

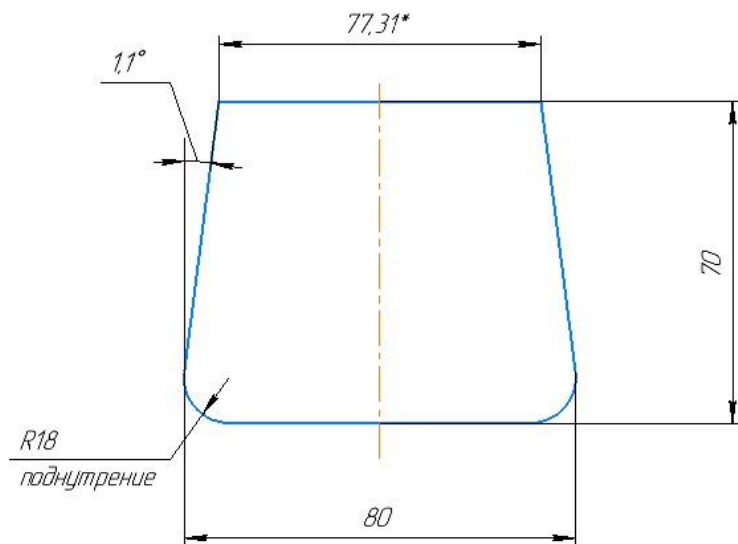


Рисунок 4.2 – Размеры пуансона

Сетка конечных элементов генерировалась только для объектов, деформирующихся упруго и/или пластически в процессе гибки. Матрица, выталкиватель, пуансон принимались жёсткими телами, планка – упругой, заготовка – упруго-пластической. Конечно-элементная сетка планки и заготовки состоит из 1000 элементов: по толщине планки - 13 элементов, по толщине заготовки - 7 элементов. На рисунке 4.3 представлена конечно-элементная модель процесса.

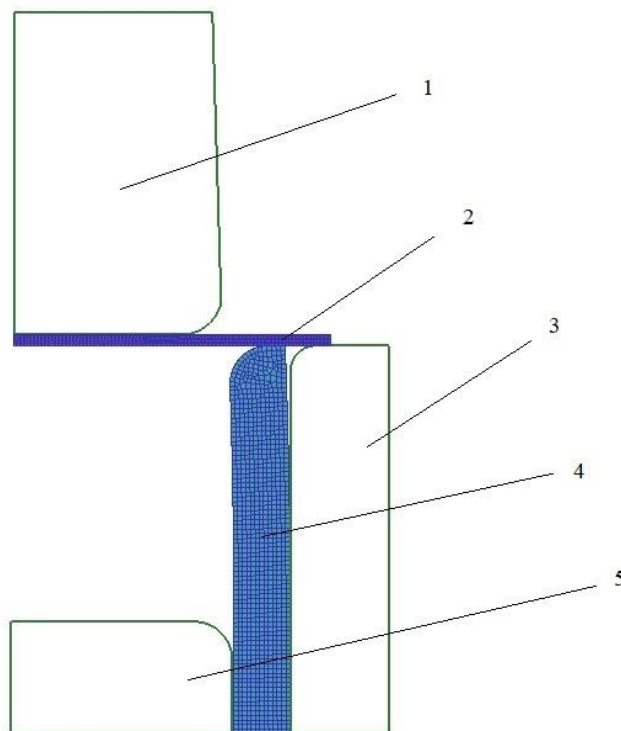


Рисунок 4.3 – Конечно-элементная модель процесса двухугловой гибки с использованием упругих планок: 1 – пуансон, 2 - заготовка, 3 - матрица, 4 – упругая планка, 5 - выталкиватель

Принималось, что планка изготовлена из стали У10, для моделирования которой задавались только упругие свойства: $E = 208\ 000$ МПа, $\nu = 0,3$ [2].

Размеры заготовки: толщина 3 мм, длина 130 мм, так как задача моделируется как «плоская», то ширина не задается. Для описания поведения

материала заготовки - алюминиевого сплава 8011А использовалась упруго-пластическая модель материала. Ортоотропия свойств материала описывалась критерием пластичности Р. Хила. Главные оси анизотропии выбирались таким образом, чтобы направление прокатки было перпендикулярно ребру гиба. Механические свойства материала заготовки приведены в таблице 4.1. Упрочнение задавалось кривой, построенной по экспериментальным точкам (рисунок 4.4).

Таблица 4.1 - Механические свойства сплава 8011А

Параметр	Значение
Модуль упругости E , МПа	69000
Коэффициент Пуассона ν	0,33
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	69,0
Предел прочности σ_b , МПа	100,0
Относительное равномерное удлинение δ_p , %	18,09
Показатели анизотропии	
μ_{21}	0,286
μ_1	0,295
μ_{12}	0,49

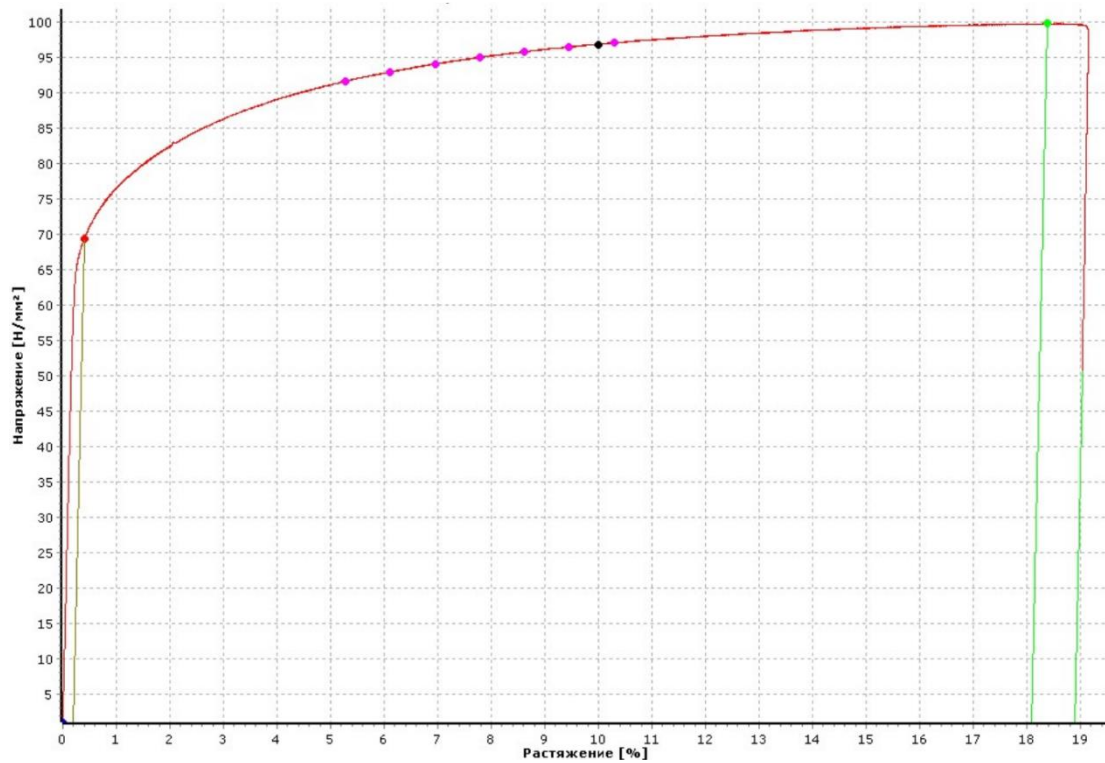


Рисунок 4.4 - Кривая упрочнения алюминиевого сплава 8011А

Принималось, что трение на всех контактирующих поверхностях подчиняется закону Кулона, коэффициент трения задавался равным 0,1.

На первом этапе моделировался ход выталкивателя вверх и выпрямление планки. На втором этапе моделировался прямой ход процесса двухугловой гибки в штампе с упругими элементами. На третьем этапе обратный ход – выталкивание детали и выпрямление планки. Скорость перемещения пуансона и выталкивателя задавалась равной 1 мм/с.

4.1.2 Напряженно-деформированное состояние при гибке с использованием билинейной планки

На рисунке 4.5 приведено распределение интенсивности напряжений и деформаций в планке при ходе выталкивателя вверх и выпрямлении планки.

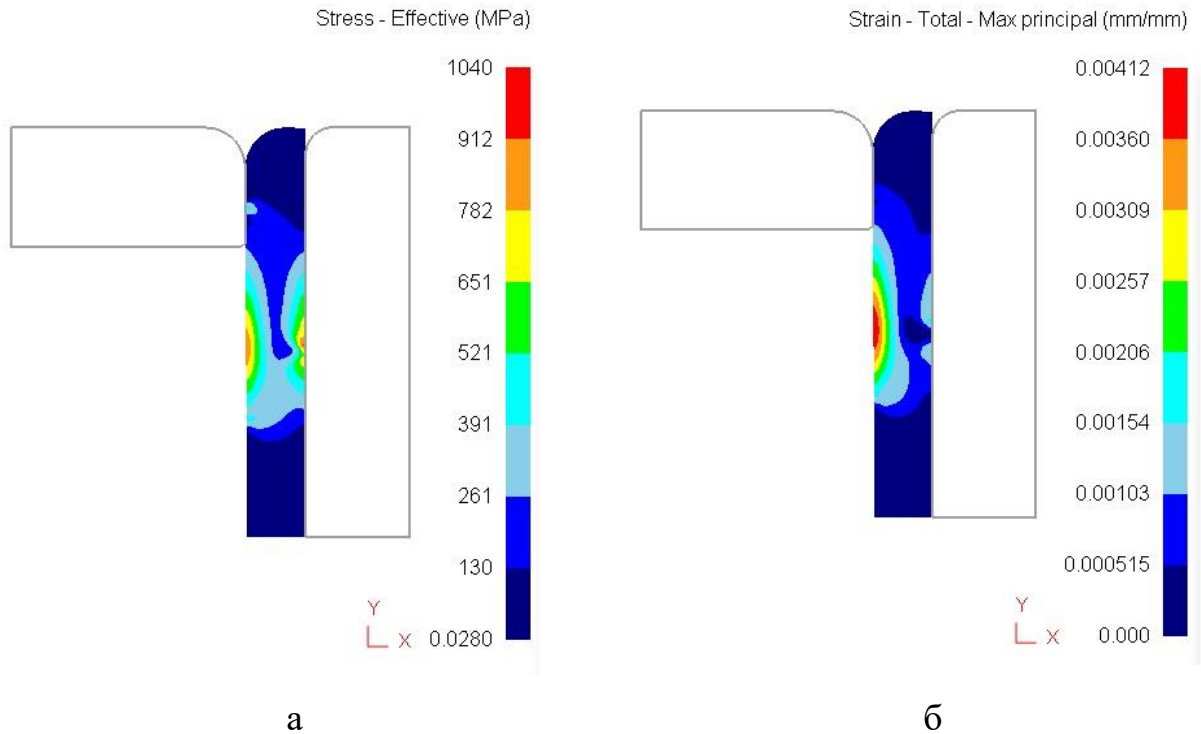


Рисунок 4.5 - Поля интенсивности напряжений (а) и упругих деформаций (б) при выпрямлении планки

Так как максимальные напряжения, действуют на поверхности планки, то проанализируем их распределение по ее длине (рисунок 4.6). Из графика видно, что максимальное значение 880 МПа наблюдается в месте радиусного сопряжения двух прямолинейных участков упругой планки, но оно не превышает предела текучести стали У10 (1080 МПа). При удалении от поверхности планки напряжения быстро убывают и достигают минимума в ее середине (рисунок 4.7).

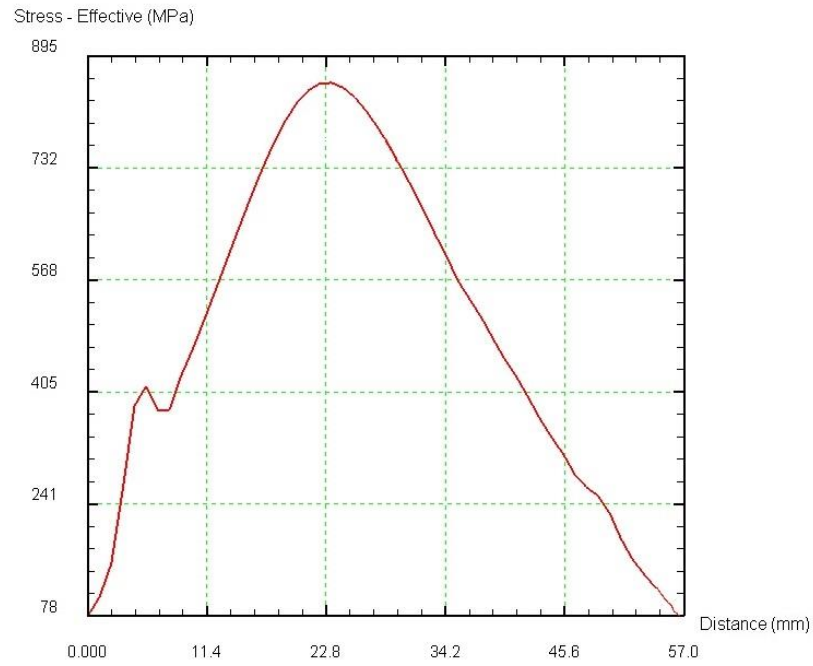


Рисунок 4.6 - Распределение интенсивности напряжений по внутренней поверхности упругой планки при ее выпрямлении

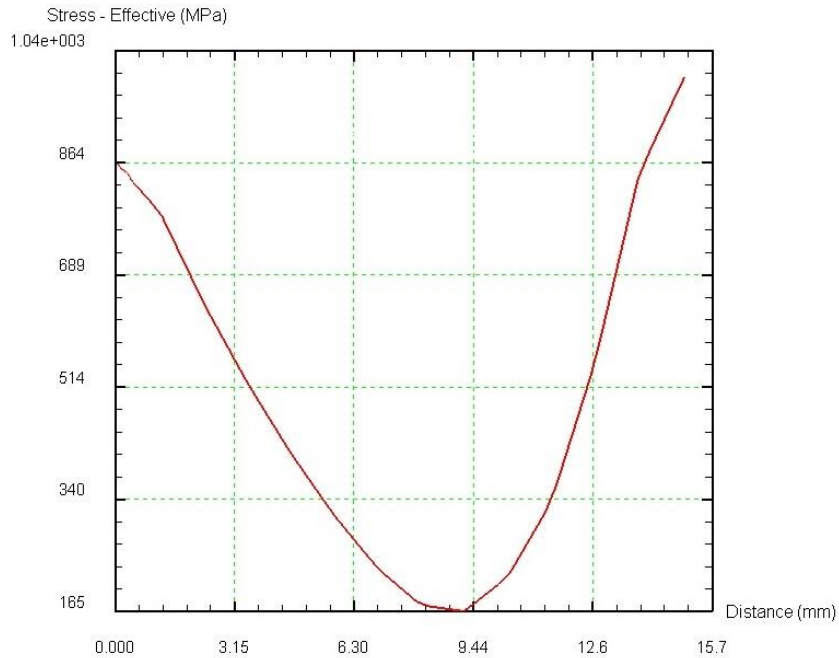


Рисунок 4.7 - Распределение интенсивности напряжений по толщине упругой планки в месте ее максимального изгиба при выпрямлении

На рисунке 4.8 показаны поля интенсивности напряжений и деформаций при гибке заготовки на половине хода пуансона. Величина напряжений в упругой планке при опускании пуансона и выталкивателя уменьшается, так как происходит ее частичное освобождение. При этом максимальные значения также наблюдаются в месте сопряжения двух прямолинейных участков и составляют 580 МПа.

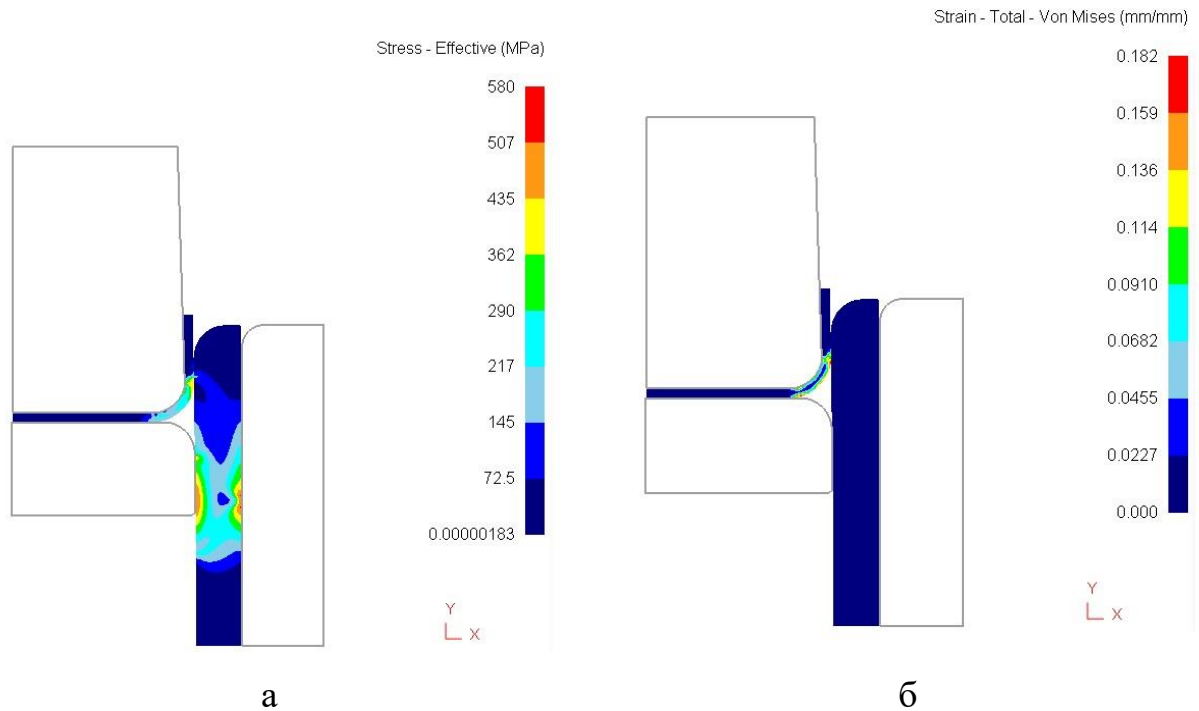


Рисунок 4.8 - Поля интенсивности напряжений (а) и деформаций (б) при половине хода пуансона

Максимальные напряжения в заготовке возникают на внутренней и внешней поверхности в месте изгиба заготовки и равны 260 МПа. Максимальные значения пластической деформации при этом наблюдаются в месте изгиба. Интенсивность деформаций в заготовке на внутренней поверхности достигает 18,2 %, а на внешней - 14 %.

На рисунке 4.9 показаны поля интенсивности напряжений и деформаций при окончании процесса гибки. В упругой планке полностью отсутствуют напряжения, так как она находится в исходном состоянии.

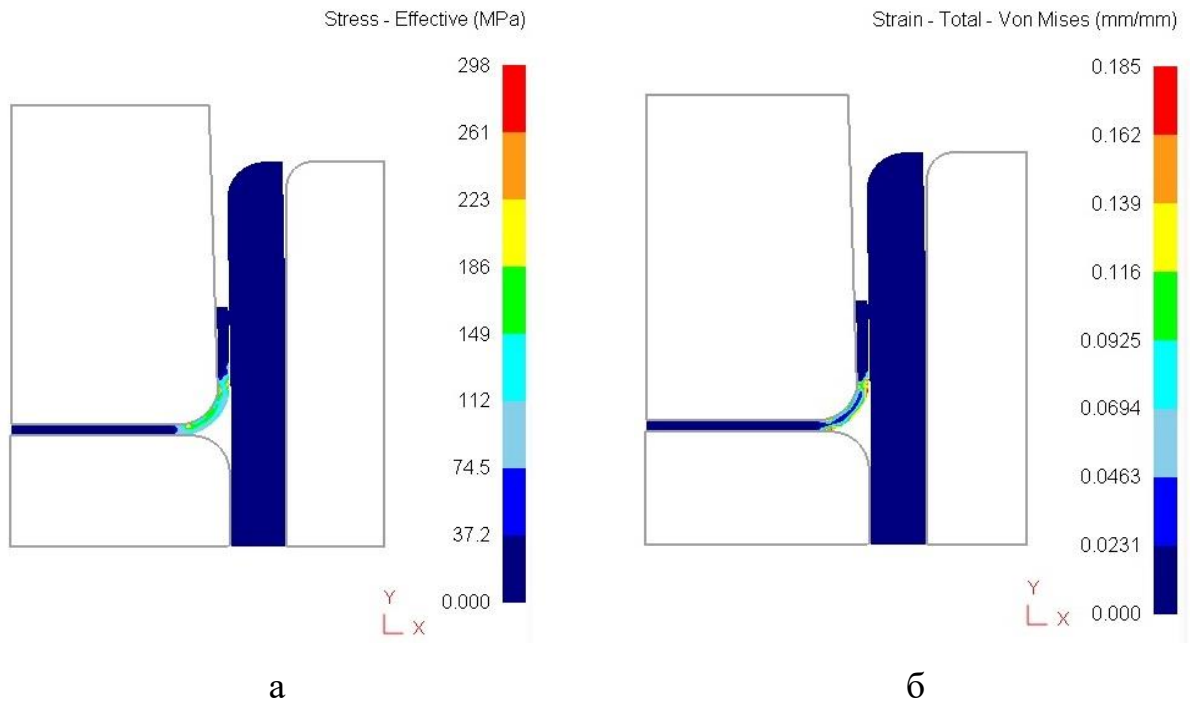


Рисунок 4.9 - Поля интенсивности напряжений (а) и деформаций (б) при полном ходе пуансона

На рисунке 4.10 показаны поля интенсивности напряжений и деформаций по окончании обратного хода. Упругая планка снова находится в максимально нагруженном состоянии (как на рисунке 4.5), так как она полностью выпрямлена выталкивателем. Освобождение полки детали от действий упругой планки привело к упругой разгрузке - перераспределению напряжений, деформаций и уменьшению угла ее загиба.

По окончании процесса гибки величина интенсивности напряжений в заготовке уменьшается до 120 МПа. Интенсивность деформаций в заготовке на внутренней поверхности достигает 18,5 %, а на внешней - 13 %.

На рисунке 4.11 показано изменение усилия гибки от хода пуансона. Диаграмма усилия во время прямого хода пуансона (кривая 1 на рисунке 4.11) является типичной для процесса двухугловой гибки [32]. При обратном ходе показано усилие на выталкивателе (кривая 2 на рисунке 4.11), которое необходимо для выпрямления планки, что требуется учитывать при проектировании буфера.

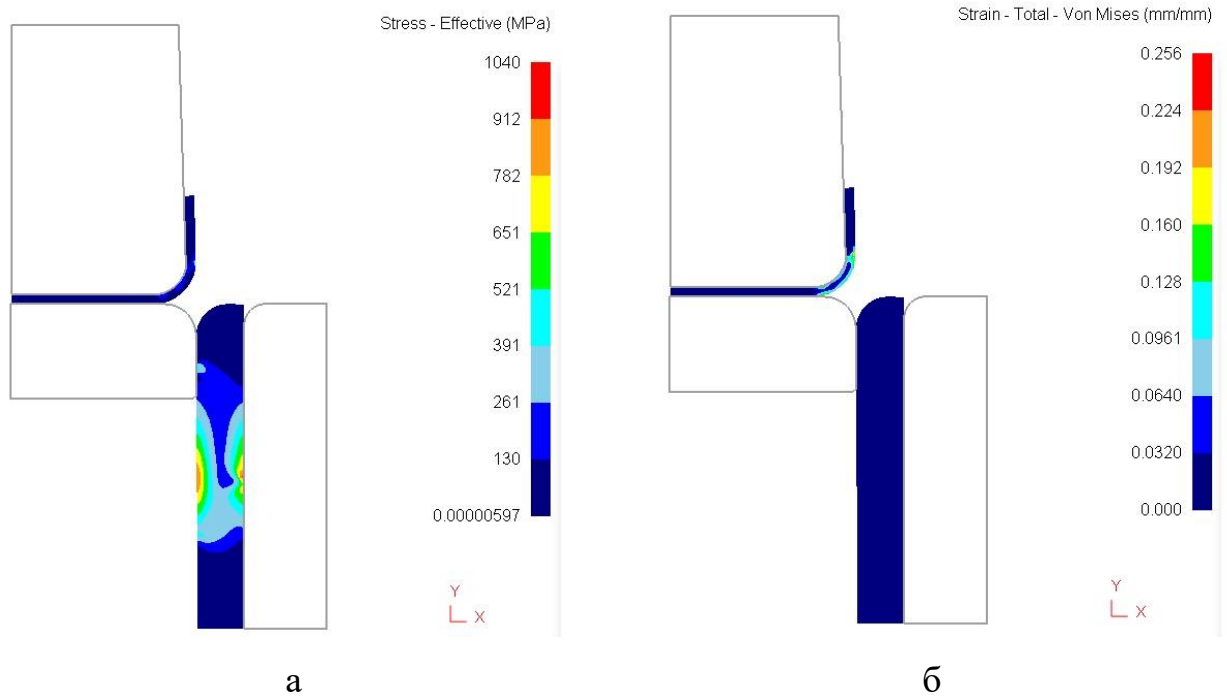


Рисунок 4.10 - Поля интенсивности напряжений (а) и деформаций (б) по окончании обратного хода

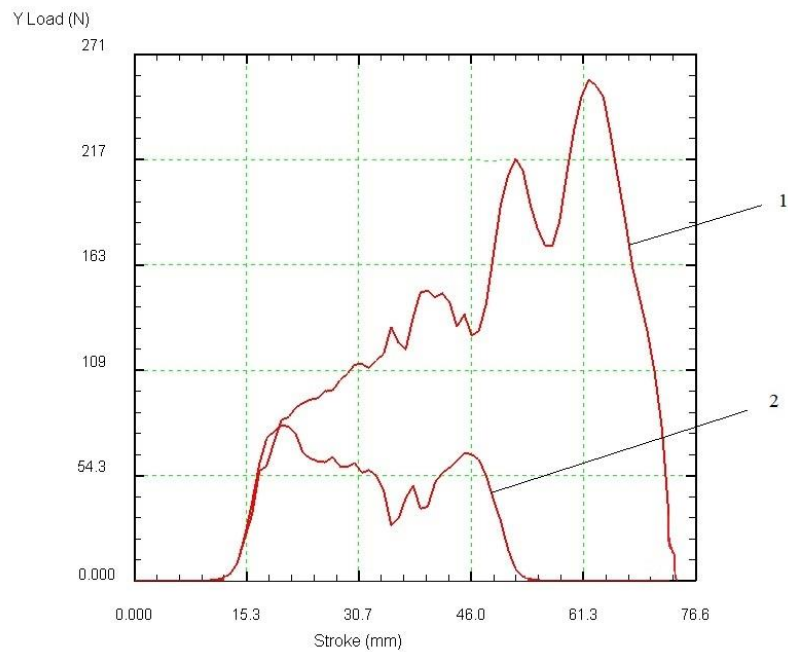


Рисунок 4.11 – Изменение усилия в зависимости от хода пуансона:

1 – процесс гибки заготовки, 2 – обратный ход

На рисунке 4.12 показано изменение усилия на упругой планке от хода пуансона. Выталкиватель при движении вверх прижимает планку к матрице с силой около 700 Н, что приводит к ее выпрямлению. При гибке заготовки с такой же силой уже упругая планка прижимает полку детали к пуансону, что и позволяет компенсировать пружинение.

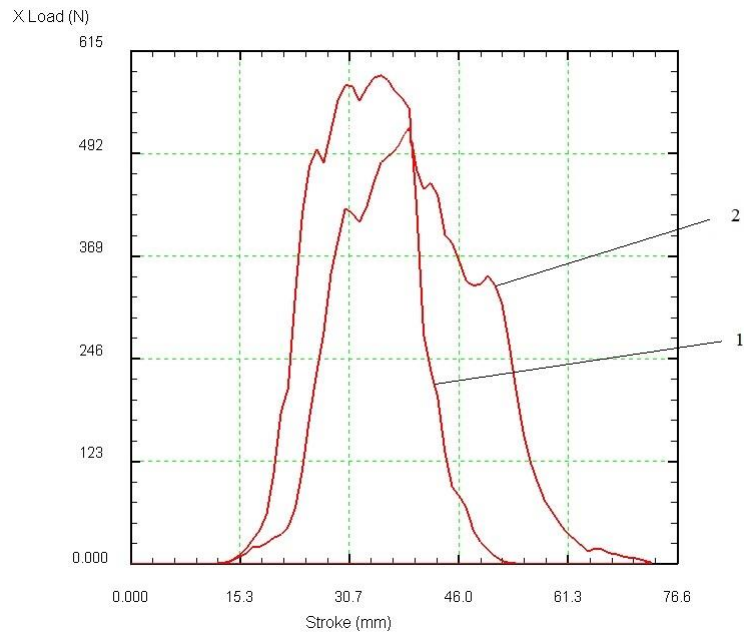


Рисунок 4.12–Изменение усилия на упругой планке в отхода пуансона: 1 – выпрямление планки выталкивателем, 2 – прижим планкой полки детали в процессе гибки

Сравнение угла детали, изготовленной с использованием упругой планки и без нее (при моделировании планка задавалась как жесткое тело) показало, что при использовании упругой планки происходит компенсация упругого пружинения (рисунок 4.13) и требуемый угол получается за одно действие без использования дополнительных операций.

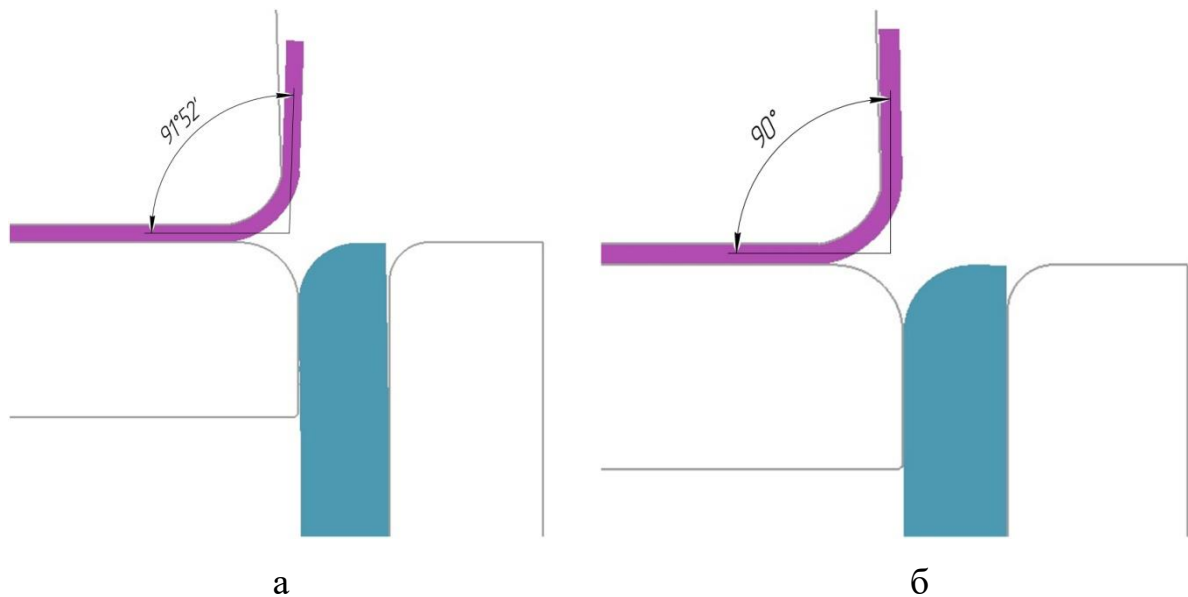


Рисунок 4.13 - Сравнение угла детали, изготовленной при использовании упругой планки (а) и без планки (б)

4.1.3 Напряженно-деформированное состояние при гибке с использованием криволинейной планки

На рисунке 4.14 приведено распределение интенсивности напряжений и деформаций в планке при ходе выталкивателя вверх и выпрямлении планки.

Так как максимальные напряжения, действуют на поверхности планки, то проанализируем их распределение по ее длине (рисунок 4.15). Из графика видно, что максимальное значение напряжений 540 МПа наблюдается вблизи прямолинейного участка упругой криволинейной планки и оно не превышает предела текучести стали У10 (1080 МПа). Как можно заметить, в криволинейной планке возникают меньшие напряжения, чем в билинейной, так как радиус скругления криволинейной упругой планки больше. При удалении от поверхности планки напряжения быстро убывают и достигают минимума в ее середине (рисунок 4.16).

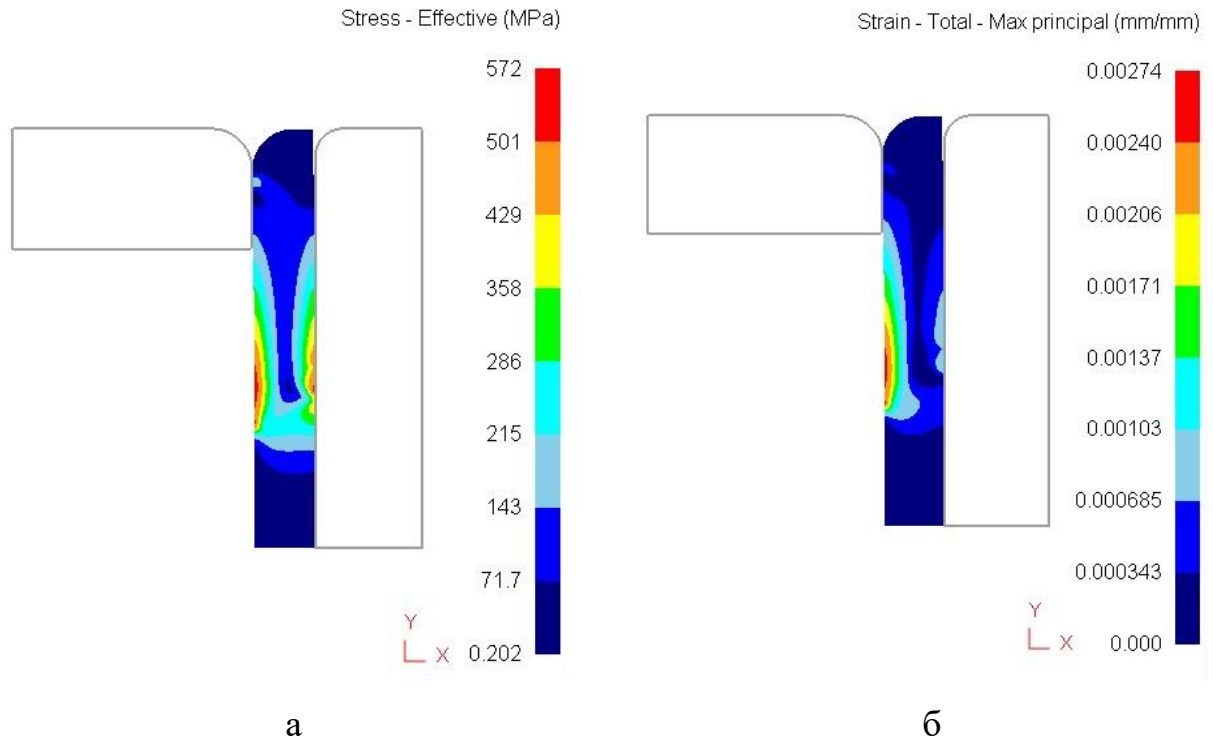


Рисунок 4.14 - Поля интенсивности напряжений (а) и упругих деформаций (б) при выпрямлении планки

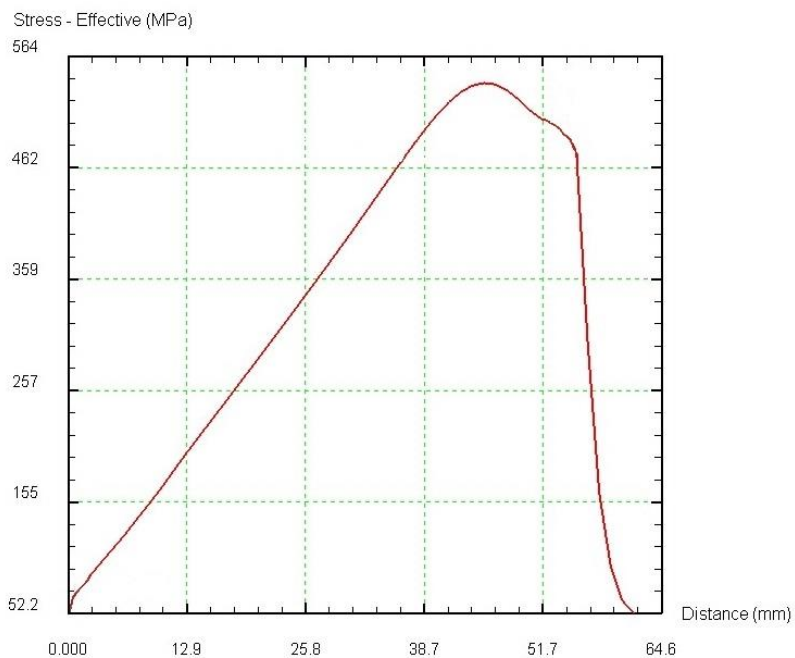


Рисунок 4.15 - Распределение интенсивности напряжений по внутренней поверхности упругой планки при ее выпрямлении

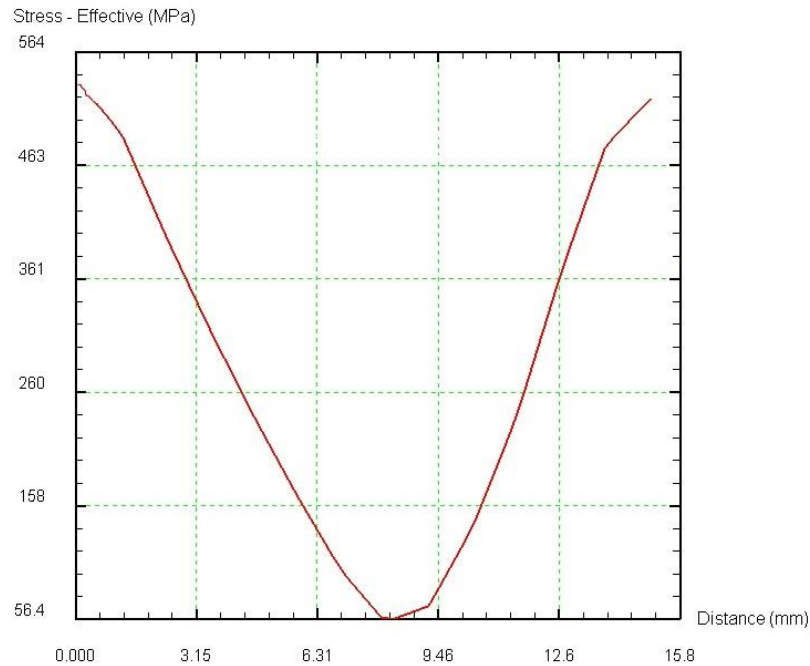


Рисунок 4.16 - Распределение интенсивности напряжений по толщине упругой планки в месте ее максимального изгиба при выпрямлении

На рисунке 4.17 показаны поля интенсивности напряжений и деформаций при гибке заготовки на половине хода пуансона. Величина напряжений в упругой планке при опускании пуансона и выталкивателя уменьшается, так как происходит ее частичное освобождение. При этом максимальные значения также наблюдаются в месте сопряжения двух прямолинейных участков и составляют 394 МПа.

Максимальные напряжения в заготовке возникают на внутренней и внешней поверхности в месте изгиба заготовки и равны 260 МПа. Максимальные значения пластической деформации при этом наблюдаются в месте изгиба. Интенсивность деформаций в заготовке на внутренней поверхности достигает 26,8 %, а на внешней - 13 %.

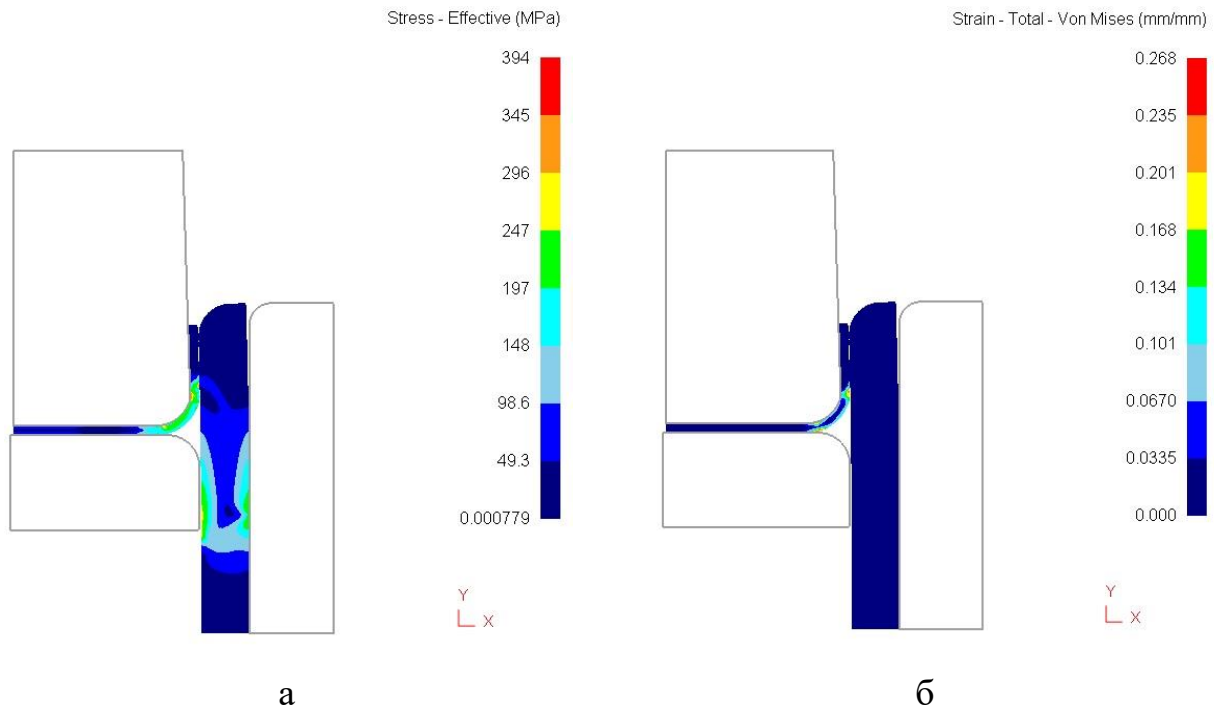


Рисунок 4.17 - Поля интенсивности напряжений (а) и деформаций (б) при половине хода пуансона

На рисунке 4.18 показаны поля интенсивности напряжений и деформаций при окончании процесса гибки. В упругой планке полностью отсутствуют напряжения, так как она находится в исходном состоянии.

По окончании процесса гибки величина интенсивности напряжений в заготовке уменьшается до 180 МПа. Интенсивность деформаций в заготовке на внутренней поверхности достигает 26,7 %, а на внешней - 16 %.

На рисунке 4.19 показаны поля интенсивности напряжений и деформаций по окончании обратного хода. Упругая планка снова находится в максимально нагруженном состоянии (как на рисунке 4.14), так как полностью выпрямлена выталкивателем. Освобождение полки детали от действий упругой планки привело к упругой разгрузке - перераспределению напряжений, деформаций и уменьшению угла ее загиба.

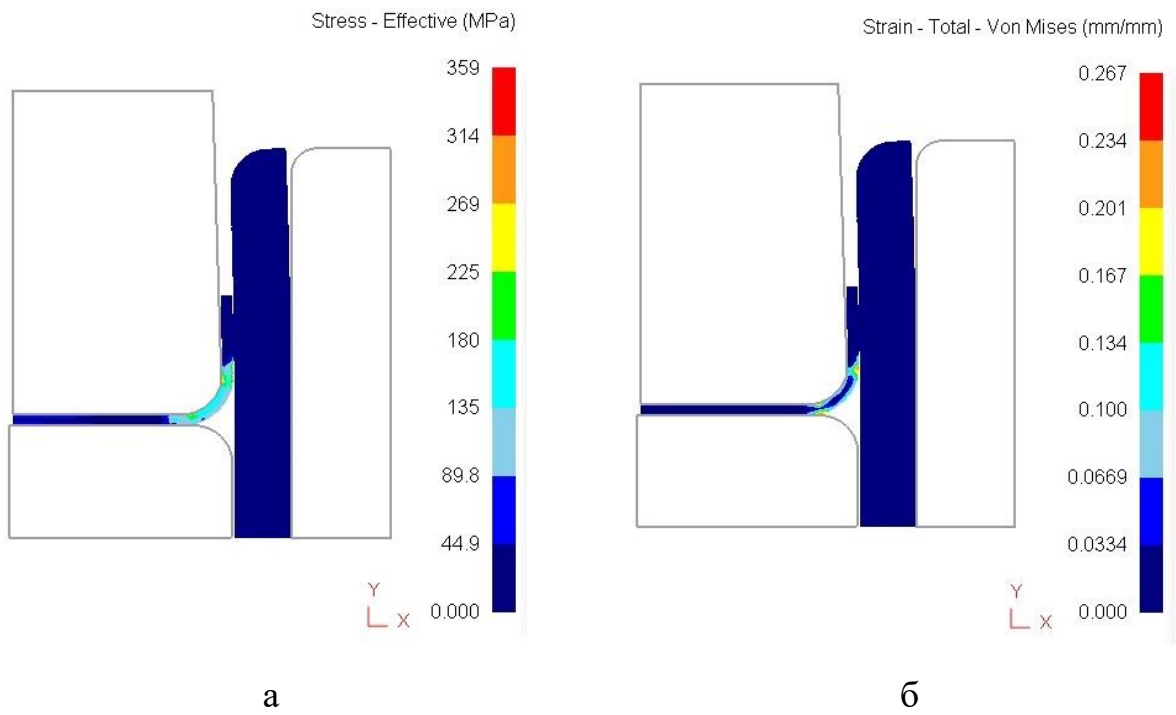


Рисунок 4.18 - Поля интенсивности напряжений (а) и деформаций (б) при полном ходе пуансона

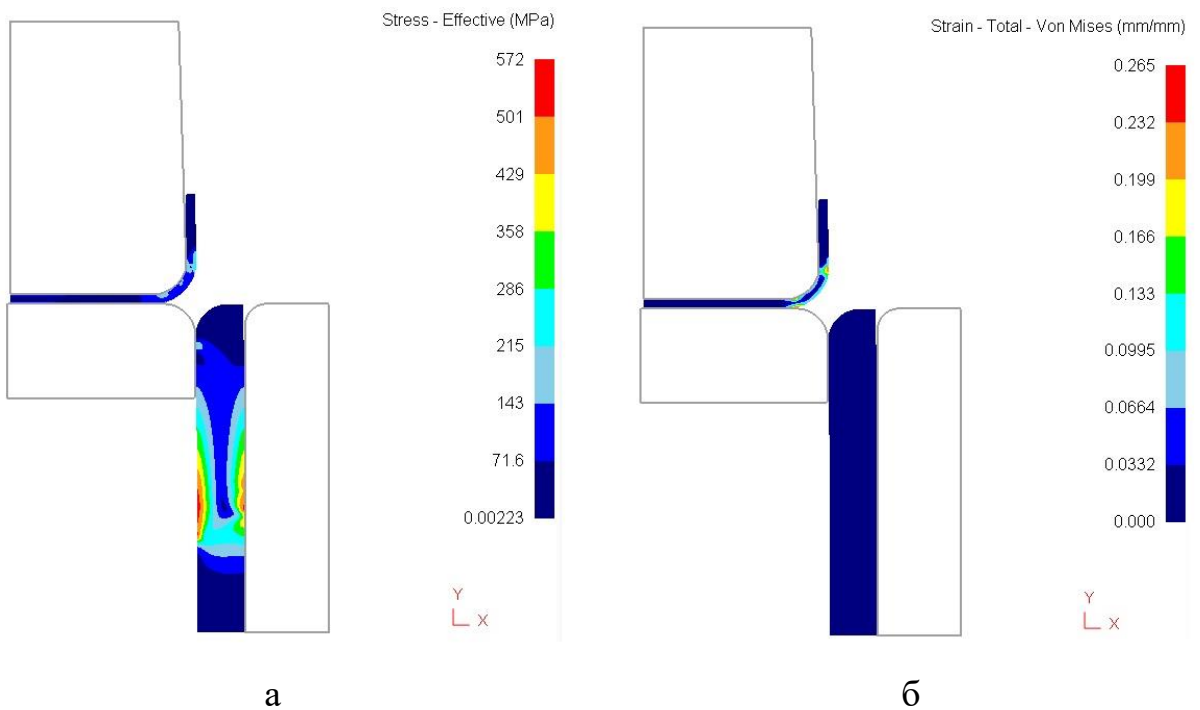


Рисунок 4.19 - Поля интенсивности напряжений (а) и деформаций (б) по окончании обратного хода

На рисунке 4.20 показано изменение усилия гибки от хода пуансона. Диаграмма усилия во время прямого хода пуансона (кривая 1 на рисунке 4.20) является типичной для процесса двухугловой гибки [32]. При обратном ходе показано усилие на выталкивателе (кривая 2 на рисунке 4.20), которое затрачивается на выпрямление планки. Величина этого усилия такая же как и для случая с использованием упругой билинейной планки (рисунок 4.11).

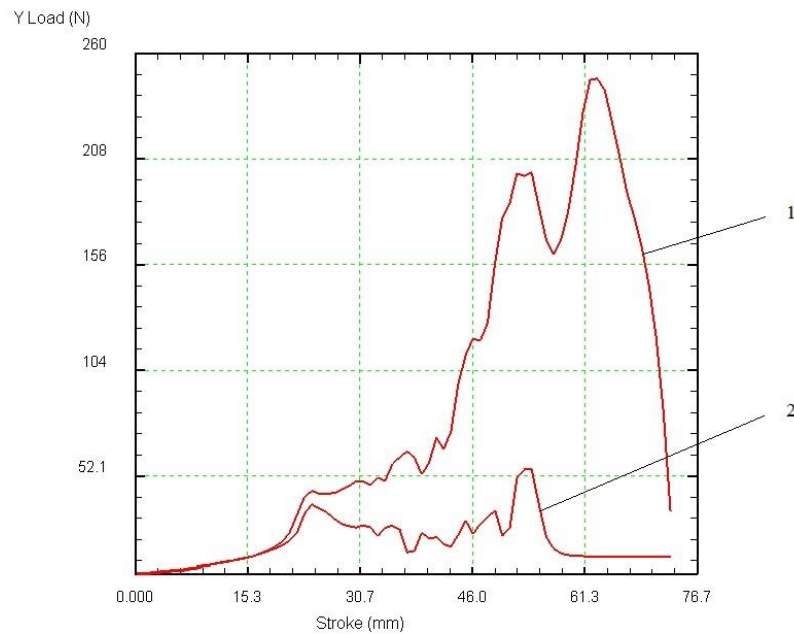


Рисунок 4.20 – Изменение усилия в зависимости от хода пуансона:

1 – процесс гибки заготовки, 2 – обратный ход

На рисунке 4.21 показано изменение усилия на упругой планке от хода пуансона. Выталкиватель при движении вверх прижимает на планку к матрице с силой около 550 Н, что несколько меньше чем для случая с использованием упругой билинейной планки и объясняется большим радиусом упругой криволинейной планки. При гибке заготовки с такой же силой уже упругая планка прижимает полку детали к пуансону, что и позволяет компенсировать пружинение.

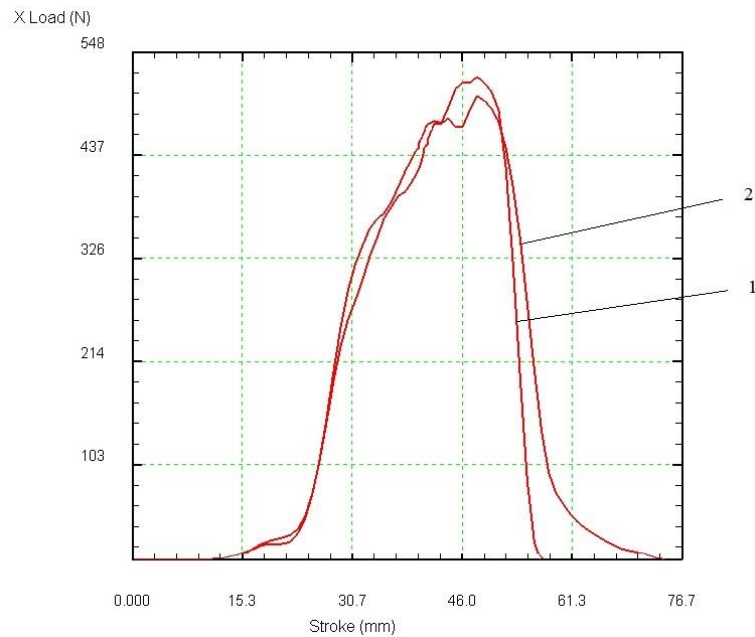


Рисунок 4.21 – Изменение усилия на упругой планке от хода пуансона:

1 – выпрямление планки выталкивателем, 2 – прижим планкой
полки детали в процессе гибки

На рисунке 4.22 показано перемещение планки в процессе гибки. Видно, что при перемещении пуансона изменяется угол наклона планки и она постепенно изгибается, возвращаясь в исходное состояние, что позволяет управлять величиной догиба заготовки за счет изменения хода пуансона.

На рисунке 4.23 показано сравнение угла детали, полученной с использованием упругой криволинейной планки, без нее (планка моделировалась как жесткое тело) и с неполным ходом пуансона. При использовании упругой криволинейной планки происходит компенсация упругого пружинения, величина которого зависит от хода пуансона. То есть использование криволинейной планки позволяет управлять угломгиба детали, как в сторону его увеличения, так и уменьшения. При этом возможно получать требуемые углы без дополнительного изменения штамповой оснастки.

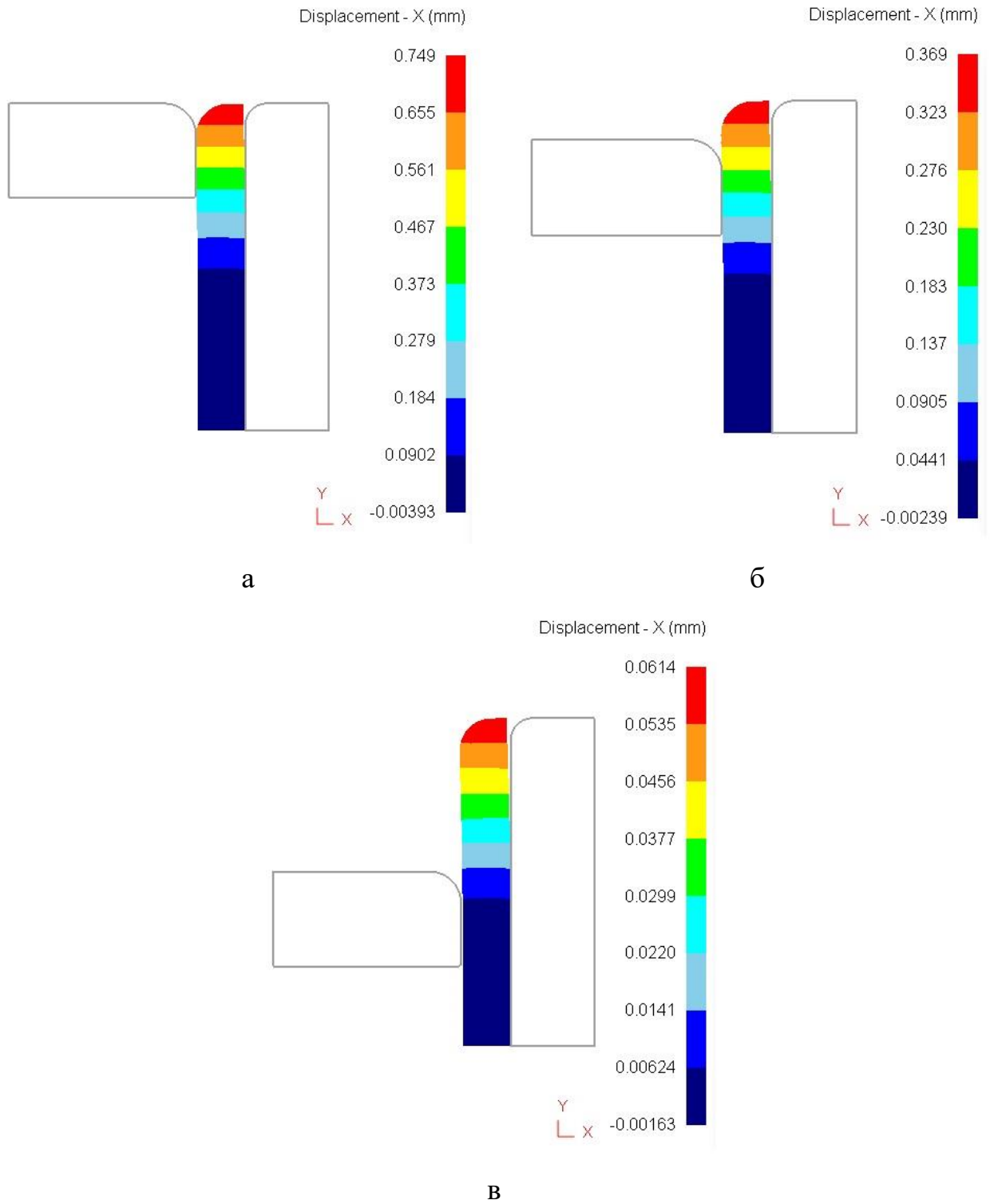


Рисунок 4.22 – Перемещение планки от исходного состояния: а - полностью выпрямленное состояние, б - 1/3 хода пуансона, в - 2/3 хода пуансона

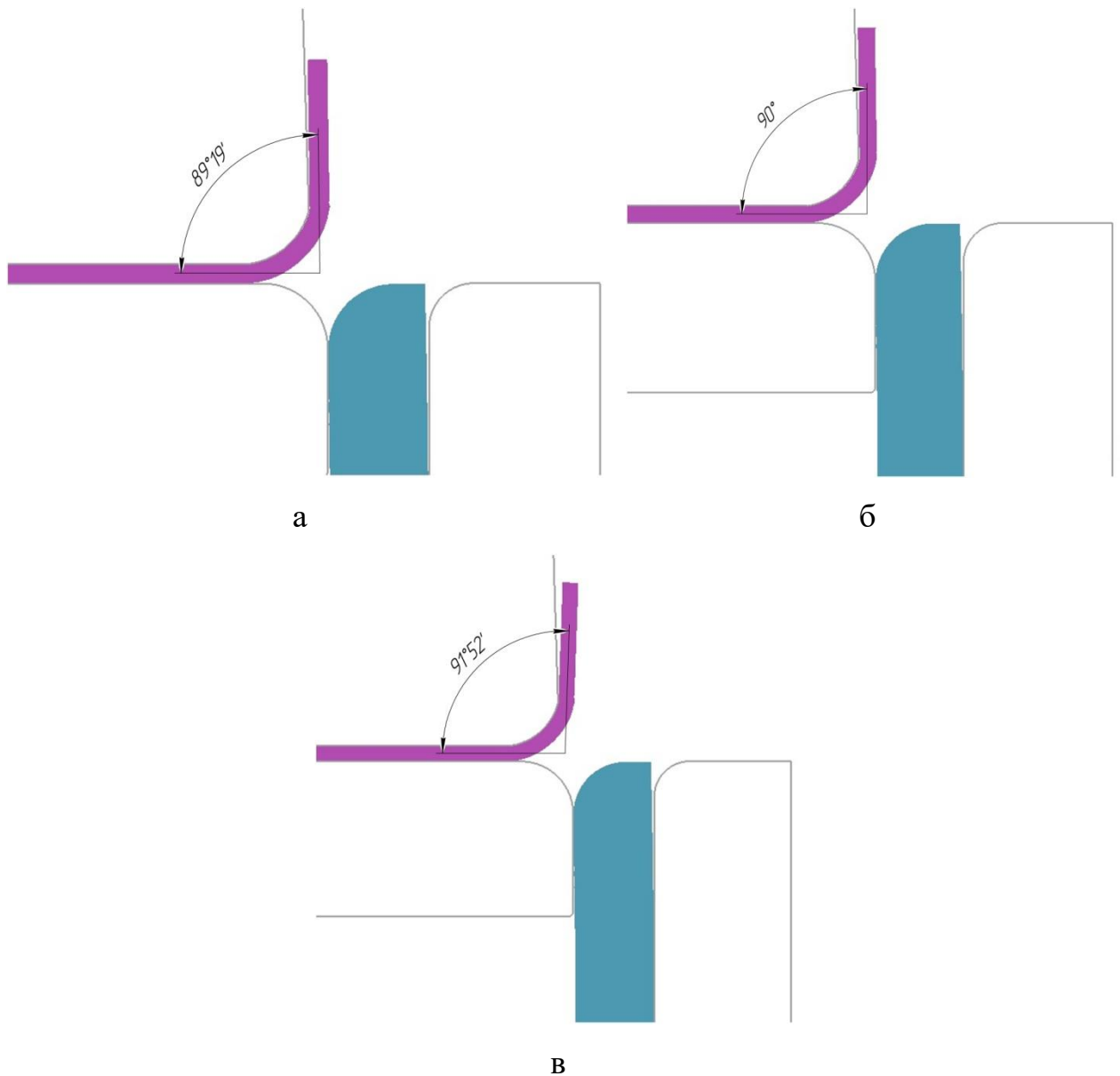


Рисунок 4.23 - Сравнение угла детали изготовленной при использовании упругой планки (а - половина хода пуансона, б - полный ход и без планки (в))

4.2 Экспериментальная проверка способа двухугловой гибки с упругим прижимом заготовки

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях. Основной задачей эксперимента являлась практическая проверка теоретических расчетов технологических параметров процесса двухугловой

гибки с упругим прижимом заготовки: геометрических размеров упругих планок (толщины, радиуса сопряжения прямолинейных участков, высоты, угла наклона, радиуса скругления кромки упругой планки) и угла пружинения детали.

4.2.1 Материалы, штамповая оснастка, оборудование

В качестве деформирующего оборудования использовалась универсальная испытательная машина TIRAtest 28300 с установленными плоскими бойками на сжатие. Для анализа деформированного состояния использовалась система бесконтактного измерения деформаций Vic-2D. В качестве деформирующего инструмента был спроектирован и изготовлен однооперационный штамп для двухугловой гибки с упругими планками, схема и размеры которого представлена на рисунке 4.24. В экспериментальной оснастке выталкиватель приводится в движение не буфером, а пружинами, которые размещены между выталкивателем и нижней плитой и создают усилие для подъема выталкивателя и тем самым выпрямляют упругие планки (рисунок 4.24, б).

Размеры пуансона и матрицы соответствуют размерам детали. Размеры упругих билинейных планок соответствуют рисунку 4.1, а. Рабочие элементы штампа, а именно пуансон, матрица и упругие планки изготовлены из стали У10. Для проведения эксперимента были изготовлены образцы из алюминиевого сплава 8011А размерами 130x20x3 мм.

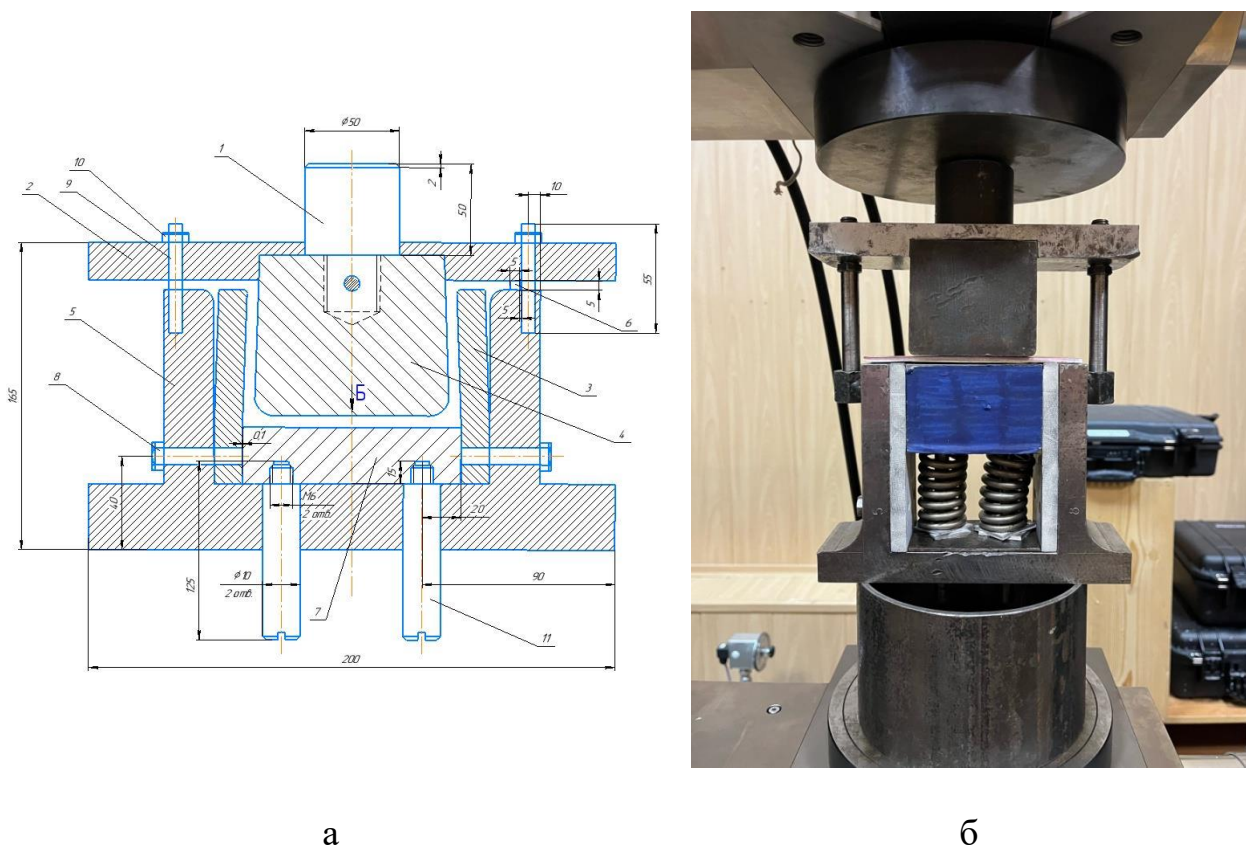


Рисунок 4.24 – Схема штамповой оснастки (а) и экспериментальный штамп (б): 1 – хвостовик; 2 – верхняя плита; 3 – упругие планки; 4 – пуансон; 5 – матрица и нижняя плита; 6 – упор; 7 – выталкиватель; 8 – болт для крепление планок, 9 - направляющий болт; 10 – болт 11 – направляющие выталкивателя.

4.2.2 Методика проведения эксперимента

1. Подготавливались заготовки для двухугловой гибки согласно чертежу.
2. На торец упругой планки при помощи специальных трафаретов наносился спекл-рисунок с размерами точек 0,18 мм (рисунок 2.2) для последующего анализа работы планок при помощи системы Vic-2D.
3. Штамповая оснастка устанавливалась на универсальную испытательную машину TIRAtest 28300. В штамповую оснастку на матрицу, выталкиватель и упругую планку помещалась заготовка.

4. Производилась калибровка системы бесконтактного измерения деформаций Vic-2D.

5. Осуществлялся одновременный запуск универсальной испытательной машины TIRAtest 28300 и системы бесконтактного измерения деформаций Vic-2D. Скорость перемещения траверсы на испытательной машине задавалась равной 5 мм/мин. Производилась запись усилия процесса.

6. В программном обеспечении Vic-2D рассчитывались поля перемещений и деформаций упругой планки.

7. По завершению процесса гибки деталь извлекалась из штамповой оснастки, производился замер угла детали при помощи угломера.

4.2.3 Результаты эксперимента

В результате процесса двухгловой гибки в штамповой оснастке с использованием упругих элементов подтверждено, что требуемый угол детали получается за одно действие, тем самым упругое пружинение для данного материала устраняется полностью [86-89]. На рисунке 4.25 представлены получившиеся детали из алюминиевого сплава 8011А: без использования упругих планок угол составил $91,8^\circ$, с упругими планками - 90° .

На рисунке 4.26 приведено изменение усилия гибки от хода пуансона. Зависимость хорошо согласуется с результатами моделирования (рисунок 4.11, с учетом ширины заготовки).

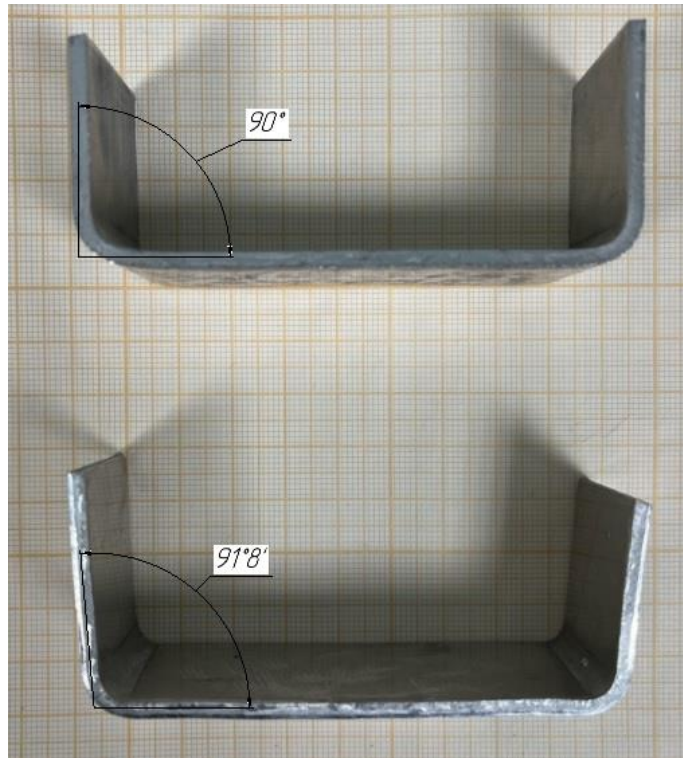


Рисунок 4.25 – Полученные детали из алюминиевого сплава 8011А: сверху - с использованием упругих планок, снизу - без использования упругих планок

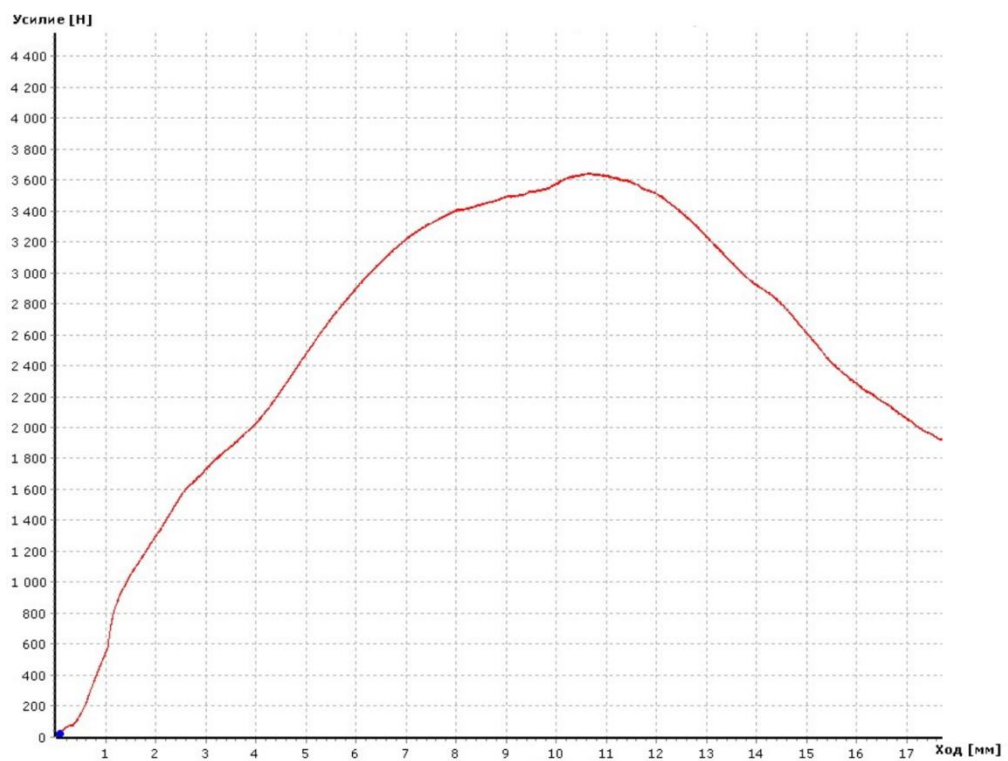


Рисунок 4.26 - График распределения усилия в процессе гибки

Кроме того, экспериментально подтверждено, что при выпрямлении упругой планки выталкивателем (рисунок 4.27, а) на ее поверхности в зоне радиусного сопряжения прямолинейных участков возникают упругие деформации (рисунок 4.27, б). На стороне, обращенной к заготовке, деформации растяжения, на стороне матрицы - сжатия. Максимальное значение деформаций равно 0,42% и не превышает предельно допустимой упругой деформации материала планки для стали У10 (0,46%).

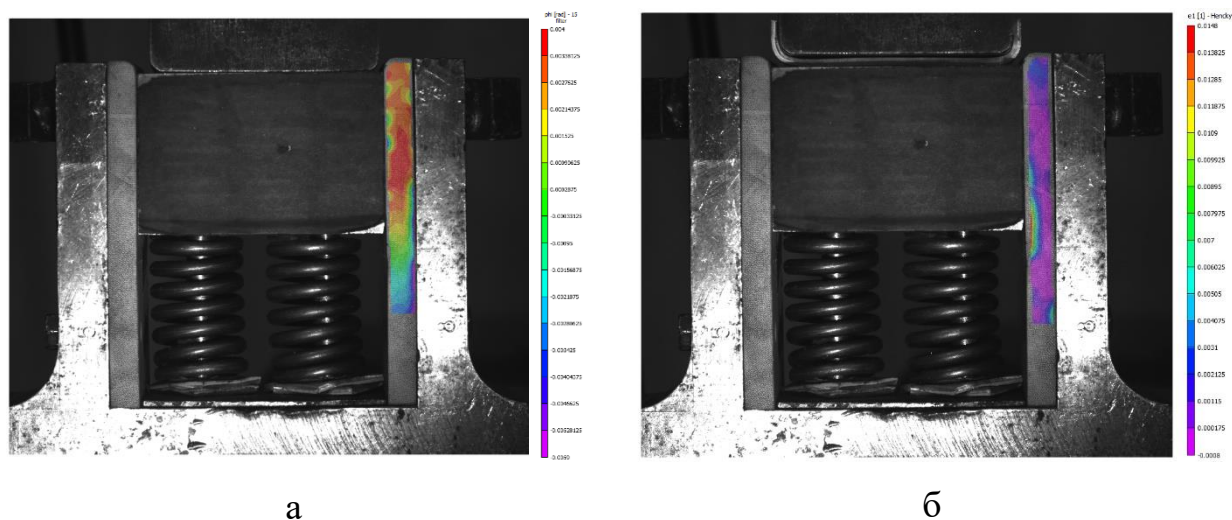


Рисунок 4.27 – Угол поворота (а) и тангенциальная деформация (б) планки при ее выпрямлении выталкивателем

4.3 Выводы по главе

1. 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.

2. Максимальное значение интенсивности напряжений наблюдается в месте радиусного сопряжения двух прямолинейных участков упругой билинейной планки и вблизи прямолинейного участка криволинейной

планки. В обоих случаях оно не превышает предела текучести выбранного материала для изготовления планки. При этом в криволинейной планке возникают меньшие напряжения, чем в билинейной.

3. Сравнение угла 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.

4. 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.

5. Экспериментально подтверждено, что при выпрямлении упругой планки выталкивателем на ее поверхности в зоне радиусного сопряжения прямолинейных участков возникают упругие деформации. Максимальное значение деформаций не превышает предельно допустимой упругой деформации выбранного для изготовления упругой планки материала.

6. 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 высокоуглеродистые 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».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысов, М.И. Формообразование деталей гибкой / М.И. Лысов, Н.В. Сосов. - М.: Машиностроение, 2001. - 388 с.
2. Конструкционные стали. Т. 1 / Науч. ред. доктора техн. наук Н. М. Скляр, Я. М. Потак; Подгот. Г. П. Алексеева, М. Ф. Алексеенко, Н. В. Анисимова [и др.]. - 1975. - 431 с.
3. Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Ч. 1. Деформируемые алюминиевые сплавы и сплавы на основе бериллия. Кн. 1. Т. 4 / Н. В. Анисимова, З. Н. Арчакова, В. П. Батраков и др.; Науч. ред. докт. техн. наук С. И. Кишкин, чл.-корр. АН СССР И. Н. Фридляндер. - 1982. - 627 с.
4. Тенденция развития алюминий-литиевых сплавов и технологии их обработки / Н.И. Колобнев, Л.Б. Хохлатова, Е.А. Лукина; под общ. ред. Е.Н Каблова - М.:ВИАМ, 2019. - 367 с.
5. Чумадин, А.С. Метод расчета процесса гибки широкой полосы из ортотропного материала / А.С. Чумадин, Т.Н. Чивикина // Вестник машиностроения. - 1996. - №6. - С. 36- 38.
6. Арышенский, Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников - М.: Металлургия, 1990. - 304с.
7. Grechnikov, F.V. Effect of anisotropic yield criterion on the springback in plane strain pure bending / F.V. Grechnikov, Ya.A. Erisov, S.E. Alexandrov // Proceedings of the International Conference Information Technology and Nanotechnology. - 2016. - С. 569-577.
8. Гречников, Ф.В. Деформирование анизотропных материалов / Ф.В. Гречников. - М.: Машиностроение, 1988. - 448 с.
9. Ковалёв, В.Г. Технология листовой штамповки. Технологическое обеспечение точности и стойкости: учебное пособие / В.Г.Ковалёв, С.В. Ковалёв. - М.: КНОРУС, 2010. - 224 с.
10. Ильин, Л.Н. Технология листовой штамповки / Л.Н. Ильин, И.Е. Семенов. - М.: Дрофа, 2009. - 475 с.

11. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. - М.: Высшая школа, 1968. - 433с.
12. Лазарян, В.А. Техническая теория изгиба / В.А. Лазарян. - Киев: Наукова думка, 1976. - 207с.
13. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности / Н.Н. Малинин. - М.: Машиностроение, 1975. - 399с.
14. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. - М.: Машиностроение, 1977. - 278с.
15. Акастелова, Н.А. Расчет утонения листового материала при гибке / Н.А. Акастелова, С.И. Вдовин, Н.Н. Убизький // Кузнечно-штамповочное производство. - 1987. - №10. - С.24-25.
16. Ландау, Л.Д. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.- М.: Наука, 1977. - 202с.
17. Karafilis, A.P. Tooling design in sheet metal forming using springback calculations / A.P. Karafilis, M.C. Boyce // Int. J. Mech. Sci.. - 1992 - 34, № 2. - С. 113-131.
18. Семин, С.В. Математическое моделирование формоизменения листовых заготовок / С.В. Семин // Проблемы пластичности в технологии: тезисы докладов II международной научно-технической конференции - Орел: ОрелГТУ. - 1998. - С. 52-53.
19. Вдовин, С.И. Предельные возможности П-образной гибки в штампе с двухуровневой матрицей / С.И. Вдовин, С.В. Семин // Кузнечно-штамповочное производство. - 1998. - №12. - С. 11-13.
20. Рубцов, Е.В. Автоматизация проектирования технологии холодной листовой штамповки гнутых деталей / Е.В. Рубцов, Т.П. Тетерин // Кузнечно-штамповочное производство. - 1990. - № 1. - С.11-16.
21. Konstruktion-Software fur komplexe Blechteile // Bander-Bleche-Rohre. - 1993.- 34, №8.- С. 198.
22. Comelan, Jack L. Flat-pattem development of sheet metal workpieces /Jack L. Comelan // Metall Form. - 1993.- 27, №3.- С. 40,42-43.
23. Колганов, И.М.Расширение технологических возможностей формообразования профилей из листовых заготовок / И.М. Колганов, Г.В.

Проскуряков, Б.В. Богданов, В.И. Колганов, С.И. Беляуш // Кузнечно-штамповочное производство. - 1987. - №8. - С. 18-20.

24. Zhan, Mei An analytical springback model for bending of welded tube considering the weld characteristics/ Mei Zhan // International Journal of Mechanical Sciences. - 2019. - № 150. - С. 594-609.

25. Al-Qureshi, H.A. Elastic-plastic analysis of tube bending / H.A. Al-Qureshi // Int. J. Mach. Tools Manuf. - 1999. - №39 (1). - С. 87-104.

26. Zhao, J. Springback theory of plane bending and the progress of study on its engineering application / J. Zhao, R.X. Zhai, R. Ma, P.P. Zhan, X.K. Song // Steel Res. Int. - 2013. - № 84 (12). - С. 1230-1240.

27. Wiebenga, J.H., Effect of material scatter on the plastic behavior and stretchability in sheet metal forming / J.H. Wiebenga, E.H. Atzema, Y.G. An, H. Vegter, A.H. van den Boogaard // Journal of Materials Processing Technology. - 2014. - № 214 - С. 238-252.

28. Parsa, M.H. Investigating spring back phenomena in double curved sheet metals forming / M.H. Parsa, S. Nasher Al Ahkami, H. Pishbin, M. Kazemi // Materials & Design. - 2012. - № 41. - С 326-337.

29. Чукин, Н.В Исследование способности высокопрочной стали к пластической деформации при изгибе на угол 90° / Н.В. Чукин, П.П. Полецков, Д.Ю. Алексеев, Г.А. Бережная, М.С. Гущина // Журнал Сибирского Федерального Университета. Техника и технологии. - 2016. - № 9(8). - С. 1326-1332.

30. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В.Сторожев, Е.А.Попов – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

31. Ильюшин, А.А. Пластичность. Основы общей математической теории / А.А. Ильюшин - Изд-во АН СССР, Москва, 1963. - 272 с.

32. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П.Романовский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1979. – 6 изд. – 520 с.

33. Зубцов, М. Е. Листовая штамповка / М. Е. Зубцов. - Машиностроение, 1980. - 432 с.

34. Норицын, И. А. Определение угла пружинения при одноугловой гибке / И. А. Норицын, Ю. Г. Калпин // Вестник Машиностроения. - 1968. - № 1. - С. 63-66.

35. Овчинников, А.Г. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / А.Г. Овчинников. - М.: Машиностроение, 1985. - 184с.

36. Арышенский, Ю. М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов / Ю. М. Арышенский. - Издательство Саратовского университета, 1973. - 112 с.

37. Шофман, Л.А. Элементы теории холодной штамповки / Л.А. Шофман. - М.: Оборонгиз, 1952. - 332 с.

38. Малов, А.Н. Технология холодной штамповки / А.Н. Малов. - М.: Машиностроение, 1969. - 568 с.

39. Патент № 784967, СССР, МКИ В21D22/02. Штамп для П-образной гибки деталей: № 2719674/25-27: заявлено 30.01.79: опубликовано 07.12.80 / Котосов А.В., Маринкин А.А., Гладкова Л.Д., Унру С.Г.; заявитель и правообладатель Фрунзенский завод тяжелого электромашиностроения "Тяжэлектромаш.

40. Аверкиев, Ю.А. Технология холодной штамповки: учебник для вузов / Ю.А. Аверкиев, А.Ю. Аверкиев - М.: Машиностроение, 1989. - 304с.

41. Rizzo, R.J. Forming odd angles / R.J. Rizzo // Mod. Mach. Shop. - 1993. - №4. - С. 94-98.

42. Никифоров, А.И. Технология штамповки мелких П-образных деталей / А.И. Никифоров, Ю.И. Лепешкин, Н.Г. Мовчан // Кузнечно-штамповочное производство. - 1989. - №2. - С. 23.

43. Патент №1706750, СССР, МКИ В21D22/02. Штамп для П-образной гибки: № 4771513/27: заявлено 19.12.89: опубликовано 23.01.92 / Конарев В.П.; заявитель и правообладатель Производственное объединение "Стрела".

44. Патент № 297557, ФРГ, МКИ В21D5/01 Biegewerkzeug, insbesondere zur Herstellung U-profilformiger Biegeteile mit exakten rechten Winkeln: - № 3438045: заявлено 04.09.90: опубликовано 16.01.92 / Barth Holger заявитель и правообладатель Waggonbau Ammendorf GmbH.

45. Кутырев, А.С. Способ компенсации пружинения при гибке U-образных деталей / А.С. Кутырев, С.Б. Климичев, Ф.П. Михаленко // Кузнечно-штамповочное производство. - 1991. - №6 - С. 12-14.

46. Патент № 1750789, СССР, МКИ В21D22/02 Способ изготовления П-образных деталей: № 4778542/27: заявлено 04.11.89; опубликовано 30.07.92 / Арутюнов И.Е., Чвилев В.В., Шукшин И.А., Павлович П.Н.; заявитель и правообладатель Липецкий политехнический ин-т.

47. Патент № 1655597, СССР, МКИ В21D5/00 Способ гибки листовых заготовок.: №4665402/27: заявлено 23.03.89; опубликовано 15.06.91 / Майоров Г.И., Луценко В.А., Рапопорт С.И., Брежнев М.Т., Майорова М.Г.; заявитель и правообладатель Коммун, горно-металлург. ин-т.

48. Карташев, А.Ф. Повышение точности гибки и калибровки деталей / А.Ф. Карташев, И.П. Ренне // Кузнечно-штамповочное производство. - 1980. - №12. - С. 15-16.

49. Schmoeckel, Dieter Das Ruckfederungsverhalten von Veinblechen / Dieter Schmoeckel, Matthias Beth // Blech. Rohre Profile.- 1993.- 40, №10. - С. 733-738.

50. Филимонов, В.И. Определение протяженности зоны плавного перехода при формообразовании профиля стесненным изгибом / В.И. Филимонов, В.А. Марковцев, А.С. Москвин //Авиационная промышленность. - 1992. - №7. - С. 5-8.

51. Арышенский, Ю.М. Теоретический анализ процесса изгиба со сжатием листовых анизотропных материалов / Ю.М. Арышенский, М.Г. Лосев, А.В. Цветков // Математическое моделирование технологических процессов обработки металлов давлением: Тезис доклада на Всероссийской научно- технической конференции. - 1990. - С. 9-10.

52. Пунин, В. И. Анализ изменения геометрии полосы в условиях профилегибки / В. И. Пунин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. - 2012. - № 2. - С. 88-94.

53. Frauke, Maevus Bestimmung der Zuschnittlänge für das Freibiegen und Schwenkbiegen von Blechen / Maevus Frauke, Sulaiman Hosen, Warstat Ralf // Blech Rohre Profile. - 1993.- №5.- С. 393-396.

54. Патент № 2078634, Российская Федерация, МПК В21D22/00. Способ с использованием штампа для П-образной гибки: № 94045442А: заявлено 27.12.94; опубликовано 10.05.97 / Вдовин С.И., Жердов В.А., Семин С.В.; заявитель и правообладатель Орловский государственный технический университет.

55. Абдулин, Ф.З. Изготовление гнутых листовых профилей повышенной жесткости из труднодеформируемых материалов / Ф.З. Абдулин, И.М. Колганов, Г.В. Проскуряков, В.И. Колганов, А.С. Москвин // Кузнечно-штамповочное производство. - 1987.- №3. - С. 18-20.

56. Комаров, А.Д. Разработка и исследование процесса стесненного изгиба листовых заготовок эластичной средой / А.Д. Комаров, В.А. Барвинок, А.А. Шаров, В.К. Моисеев // Кузнечно-штамповочное производство. - 1996. - №10. - С. 25-29.

57. Stahl, W. Schwenkbiegen verbucht Pluspunkte / W. Stahl //AV: Arbeitsvorbereit. - 1993.- №6.- С. 194-195.

58. Gleiche Kraft auf der ganzen Biegelänge // Werkstatt und Betr. - 1996 - №9 - С. 39-S40

59. Тюрин, Е.А. Промышленные роботы в металлообработке / Тюрин Е.А. // Автоматизация в промышленности. - 2018. - № 4. - С. 41-43.

60. Feifei, Zhang Experimental study of springback behavior in incremental bending process/ Zhang Feifei, Ruan Jianbin, Zhang Ji, He Kai, Du Ruxu // Procedia manufacturing. - 2018. - № 15. - С. 1290-1297.

61. Zuo, Q. A novel incremental sheet bending process of complex curved steel plate / Q. Zuo, K. He, X. Dang, W. Feng, R. Du // Journal of Manufacturing Science and Engineering. - 2017. - № 139 (11).

62. Xiaobing, Dang A new flexible sheet metal forming method of incremental bending/ Dang Xiaobing, He Kai, Zhang Feifei, Du Ruxu // Procedia Manufacturing. - 2018. - № 15. - С. 1298-1305.

63. Rationelles Gesenkbiegen und Abkanten // Werkstatt und Betr. . - 1996 - №6. - С. 609.

64. Патент № 2494830, Российская федерация, С2 Штамп для глубокой вытяжки осесимметричных деталей: № 2011149621/02: заявлено 06.12.2011: опубликовано 10.10.2013 / Попов И.П., Нестеренко Е.С., Кузина А.А.; заявитель и правообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет.

65. Патент № 1526870, Российская федерация, МПИ В21D5/01. Способ гибки листового материала с использованием плоских пластин: 1987 / Бородаев Л.И., Мисаилов А.Г., Игошин В.В., Пермяков А. К, Золотов М.А.

66. Громова, Е.Г. Исследование процесса стесненного изгиба листовых деталей с использованием полиуретана методом конечно-элементного моделирования / Е.Г. Громова, Е.В. Еськина, А.А. Шаров // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2011. - № 3. - С. 86-90.

67. Громова, Е.Г. Экспериментальные исследования процесса штамповки полиуретаном листовых заготовок в условиях стесненного изгиба / Е.Г. Громова, Е.В. Еськина // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2015. - № 1. - С. 132-137.

68. Патент №40230, Российская федерация, U1. Штамп для изгиба листовых деталей: № 2004112655/22: заявлено 27.04.2004: опубликовано 10.09.2004 / Комаров А.Д., Моисеев В.К., Овчинникова Е.В., Ткаченко И.С., Шаров А.А.

69. Патент № 64115, РФ, В21D 22/10 Штамп для изгиба листовых деталей: № 2006141265/22: заявлено 21.11.2006: опубликовано 27.06.2007 / А. Д. Комаров, В. К. Моисеев, А. Ю. Костенюк, Е. В. Овчинникова; - 4 с.

70. Патент № 2691478, С1 Способ гибки длинномерных полых изделий с профилем открытого типа: № 2018132021: заявлено 07.09.2018: опубликовано 14.06.2019 / Галкин В.И., Палтиевич А.Р., Галкин Е.В., Преображенский Е.В., Борунова Т.И.

71. Volgushev, A. Improving the quality of parts produced by bending in a die with an elastic element / A. Volgushev, E. Nesterenko, K. Frese // Key Engineering Materials 2019. -Vol. 822. - P. 144-149

72. Бурдуковский, В. Г. Технология листовой штамповки : учебное пособие / В. Г. Бурдуковский. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. - 224 с.
73. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. 3-е изд., перераб. и доп. / Г.А. Смирнов-Аляев. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. - 368 с.
74. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. - М.: ГИТТЛ, 1956. - 407 с.
75. Томленов, А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томленов. - Изд-во Metallurgia, 1972. - 408 с.
76. Тимошенко, С.П. Курс теории упругости/ С.П. Тимошенко. - Издательство «Наукова думка». Киев, 1972. - 506 с.
77. Третьяков, Т.В. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций / Т.В. Третьяков, М.П. Третьяков, В.Э. Вильдеман / Пермский государственный технический университет. Механика. - 2011. - №2. - С. 92 – 100.
78. Vic-3D CorrelatedSolutions. Руководство по проведению испытаний. - 2009. - 64 с.
79. Vic-3D CorrelatedSolutions Справочное руководство/ 2010. – 109 с.
80. 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.
81. Кузин, А.О. Штамп 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.
82. Гречников, Ф.В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением в программе DEFORM-2D / Ф.В. Гречников, В.Р. Каргин, Б.В. Каргин, А.Г. Шляпугин, Я.А. Ерисов. - Из-во: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2007. - 291 с.
83. 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.

84. 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.

85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. 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.

89. 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.

Приложение А



ФЕДЕРАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНСТВО
 Федеральное государственное унитарное предприятие
**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
 РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»**
 ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»

ул. Земеца, д. 18, г. Самара, 443009, тел. (846) 955-13-61, факс (846) 992-65-18, E-mail: Mail@samspace.ru

№ _____

На № _____ от _____

Утверждаю



Первый заместитель генерального
 директора, главный инженер

С.В. Тюлевин

2011 г.

АКТ

Внедрения результатов исследования процесса двухугловой гибки
 Нестеренко Е.С., Кузина А.О.

Настоящий акт составлен о том, что разработанные и переданные руководяще-технические материалы усовершенствования процесса двухугловой гибки в штампе с упругим элементом, использованы в 2011 году на деталях «балка».

Использование данных материалов в технологических процессах основанных на операциях гибки дало следующее:

1. Снижение упругого пружинения детали за счет формы упругой планки и формы пуансона;
2. Уменьшение машинного времени изготовления деталей за счет исключения из технологического процесса операции калибровка;
3. Улучшение качества поверхности детали.

Главный технолог

Е.П. Семененко

Начальник отдела 2612

Ю.Е. Паламарчук