



Левашова Екатерина Львовна

**Технологическое обеспечение и повышение качества
сложнопрофильных деталей из листовых заготовок методом свободной
гибки**

2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Санкт Петербург
2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном
учреждении высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель

Радкевич Михаил Михайлович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Мнацаканян Виктория Умедовна, доктор технических наук, профессор кафедры
горного оборудования, транспорта и машиностроения, Университет науки и технологий
МИСИС, г. Москва

Иванов Юрий Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры
«Конструкторско-технологическая подготовка машиностроительных производств»,
Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, г.Ижевск

Ведущая организация:

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург**

Защита диссертации состоится « 11 » июня 2024 г. в 10-00 часов на заседании
диссертационного совета У.2.5.6.26 федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул.
Политехническая, 29, главный учебный корпус, аудитория 346.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru
федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Хрусталева Ирина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время технологический процесс гибки листового металла применяется во многих отраслях производства. Это автомобильная, сельскохозяйственная промышленность, авиастроение, приборостроение и т.д. Чаще всего, сложнопрофильные детали из листового металла получают методом сварки из предварительно изогнутых элементов простого профиля деталей, либо методом гибки с использованием специальной оснастки.

Изготовление гибкой сложнопрофильных деталей из листового металла, по сравнению со сваркой сложнопрофильных деталей, характеризуется более высоким качеством, поскольку отсутствуют дефекты, образующиеся в зоне термического влияния сварного изделия.

Одним из высокотехнологичных методов гибки листового металла является свободная гибка, особенностью которого является использование универсального инструмента для изготовления деталей различной геометрии. Это позволяет минимизировать количество необходимых инструментов, уменьшить себестоимость производства и производить большой ассортимент деталей с различным профилем.

Технологи при расчете размеров заготовки детали из листового металла используют поправочный коэффициент К-фактор, который сказывается на точности получаемых размеров. В настоящее время, после расчета развертки для того, чтобы убедиться в правильности проведения расчетов на предприятии, проводят предварительное тестирование. Оно заключается в том, что расчетная заготовка подвергается гибке по которой определяют наличие или отсутствие дефектов. В случае наличия дефектов размеры развертки корректируют, проводят заново предварительное тестирование и при получении качественной детали запускают в производство.

Для обеспечения высокого качества деталей, 4-5 квалитета точности и уменьшении трудоемкости подготовительного цикла производства предлагается на первоначальном этапе проектирования технологического процесса методом свободной гибки деталей отработать конструкторский чертеж на технологичность.

К основным показателям качества сложнопрофильных деталей, получаемых свободной гибкой из листового металла, следует отнести качество поверхностного слоя, точность размеров и формы отверстий. Все это вызвало необходимость проведения экспериментальных исследований по установлению закономерностей влияния параметров технологического процесса свободной гибки на качество получаемых изделий. Следовало получить базу данных параметров процесса свободной гибки, номограмм, определяющих

области получения дефектных и бездефектных деталей, разработать методику проектирования технологического процесса изготовления качественных изделий сложного профиля, исключая промежуточный этап, заключающийся в тестировании детали на предмет наличия дефектов с помощью листогибочного станка.

Задача получения необходимой базы данных, номограмм, определяющих области получения дефектных и бездефектных деталей в зависимости от расположения отверстия относительно линиигиба, диаметра отверстия, а также получения расчетных формул оценки некруглости отверстий в зависимости от их расположения на исходной заготовке, является актуальной задачей.

Степень разработанности

Гибка листового металла является малоотходным, высокопроизводительным методом обработки металла давлением с целью получения сложнопрофильных деталей. На основе теоретического анализа возможных деформаций отверстий после гибки деталей с апробацией результатов на практике становится возможным научное прогнозирование и разработка новых высокоэффективных методов, которые могут быть применимы на производстве в ближайшем будущем.

Основу теории гибки листового металла создали такие ученые как С. И. Губкин, А. Д. Томленов, А. А. Ильюшин, Ю. М. В. Сторожев, Е. И. Исаченков, М. Н. Горбунов, И. П. Ренне, Ю. Л. Поляков, Н. И. Коренев, М. И. Лысов, Э. Зибель, Э. Томсен, Б. Сен-Венан, М. Губер, Г. Закс, В. Джонсон и другие.

Значительный вклад в исследования, направленные на совершенствование производства деталей из листового металла внесли Богоявленский К.Н., Мертенс К.К., Рис В.В., Мамутов В.С., Попов Е.А., Тлустенко С.Ф., Самохвалов В.Н., Романовский В. П.

Основными направлениями развития гибки листового металла являются повышение качества деталей, точности размеров и снижение себестоимости готовой продукции. За счет этого, растет востребованность использования метода свободной гибки листового металла универсальным инструментом, для изготовления деталей различной формы.

Изделия, используемые в авиастроении, в высокоточном машиностроении, требуют обеспечения высокого качества получаемых деталей (точность получаемых размеров не ниже 6 квалитета, шероховатость не больше Ra 1.6 мкм, отклонение от круглости не более 0,01 мм) [2]. Качество отверстия контролируется по ГОСТ 24643-81 «Допуски формы и расположение отверстий» и характеризуется параметром круглости [3]. Предъявляемые требования должны учитываться при составлении технологического процесса и обеспечены выбранным инструментом.

В настоящее время создано большое количество САЕ-программ, позволяющих технологам, автоматически подобрать требуемый инструмент (при наличии подходящей геометрии инструмента в САЕ-программе) для выполнения гибочной операции, создать развертки заготовок в зависимости от выбранного инструмента и сформировать управляющий код на станок с ЧПУ.

В работе были проанализированы и протестированы следующие САЕ- программы: QForm, Radbend, Metamation Flux.

Программа Metamation Flux была выбрана для практического исследования, как программа, учитывающая наибольшее количество переменных. В частности, учитывается выбор геометрии из библиотеки стандартного инструмента, указания последовательности гибочных операций, расчет развертки, создание управляющей программы для ЧПУ станка и оценка возможных искривлений форм отверстий после гибки.

Программа Metamation Flux не дает рекомендации по изменению конструкции детали, для предотвращения получения дефектных деталей.

Цель исследования - обеспечение качества, точности размеров, повышения производительности, снижения трудоемкости и усовершенствование методики проектирования технологического процесса свободной гибки при изготовлении сложнопрофильных деталей из листового материала.

Задача исследования - разработать математическую модель оценки качества деталей сложного профиля при изготовлении их свободной гибкой с учетом основных факторов процесса и предложить методику, позволяющую снизить трудоемкость проектирования технологического процесса и подготовительного этапа производства сложнопрофильных деталей методом свободной гибки.

Для решения поставленной задачи необходимо было:

- получить математическую модель оценки качества сложнопрофильных изделий с наличием отверстий, их расположением относительно линиигиба, с учетом толщины исходной заготовки, также марки стали;
- разработать методику проектирования технологического процесса изготовления деталей сложного профиля с предварительной отработкой конструкторской детали на технологичность, что позволило бы исключить предварительное тестирование;
- построить номограммы, позволяющие осуществить оценку качества получаемых деталей, полностью исключив предварительное тестирование на этапе подготовки технологического процесса их изготовления методом свободной гибки;

- в результате научного эксперимента определить поправочный коэффициент (К-фактор), имеющий важное значение и влияющий на выбор исполнительного инструмента и размер детали.

Научная новизна заключается:

- в разработке математической модели оценки риска образования дефектов отверстий в деталях сложного профиля при свободной гибке в зависимости от места расположения отверстия относительно линиигиба при изготовлении их из углеродистых и легированных сталей;

- в разработке методики проектирования технологического процесса и усовершенствования последовательности этапов подготовки производства сложнопрофильных деталей из стали 3 и 12X18H10T свободной гибкой с использованием программного обеспечения Metamation Flux;

- в практических рекомендациях по выбору рациональных режимов технологического процесса свободной гибки, которые обеспечивают изготовление высококачественных деталей при толщине листовой заготовки от 0,5 до 2,0 мм.

Теоретическая значимость работы заключается:

- в получении математической модели технологического процесса свободной гибки сложнопрофильных изделий. Модель позволяет сделать оценку качества получаемого изделия;

- в разработке методики проектирования технологического процесса свободной гибки сложнопрофильных деталей с учетом отработки их на конструктивную технологичность и использованием программного обеспечения Metamation Flux.

Практическая значимость работы заключается:

- в полученных результатах научного исследования по разработке технологического процесса свободной гибки с использованием предложенной методики, включающей предварительную отработку конструкции детали на технологичность и используемой в программе Metamation Flux, как дополнительный модуль, что обеспечивает изготовление высококачественных сложнопрофильных деталей, а также позволяет осуществлять автоматический анализ результата технологического процесса получения деталей методом свободной гибки;

- в использовании номограмм для предварительной оценки образования возможных дефектов в деталях сложного профиля с отверстиями, получаемых гибкой, а также в возможности перед началом производства деталей, выбрать такое положение отверстия на исходной заготовке, которое обеспечивает изготовление бездефектных деталей;

- в определении величины поправочного коэффициента (К-фактора), учитывающего ширину раскрытия матрицы, обеспечивающей точность размеров деталей пределах 4-5 качества.

Объектом исследования является технологический процесс свободной гибки сложнопрофильных деталей из конструкционных сталей.

Предметом исследования является качество (отклонение округлости отверстий), точность размеров и эффективность процесса изготовления сложнопрофильных деталей при свободной гибке.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель оценки расчета параметра некруглости (отношения отклонения округлости к фактическому диаметру отверстия) $(\Delta T/d_o)\%$ в зависимости от расположения центра отверстия относительно линиигиба, диаметра отверстия и толщины листа из стали 3 и 12X18H10T.

2. Методика проектирования технологического процесса изготовления сложнопрофильных деталей, заключающейся в оптимизации последовательности этапов проектирования технологического процесса свободной гибки деталей из легированных и углеродистых конструкционных сталей с использованием программного обеспечения Metamotion Flux.

3. Математическая модель расчета поправочного коэффициента (К-фактора) от ширины раскрытия матрицы при изготовлении сложнопрофильных деталей методом свободной гибки.

Степень достоверности и апробация результатов

Материалы диссертационного исследования представлялись на следующих научно-практических конференциях: Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении», Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022г., Международная научно-практическая конференция “Перспективные машиностроительные технологии” 21-25 ноября 2022, Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении», Санкт-Петербург, 27–30 ноября 2023г.

Разработанная методика определения возможных отклонений от круглости отверстий после гибки была апробирована на предприятии ООО “Промышленные Партнёры” г.Санкт-Петербург.

Работа соответствует паспорту специальности – 2.5.6. «Технология машиностроения» пунктам: 4. «Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска» 5. «Методы проектирования и оптимизации

технологических процессов» и 7. «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений (А – Д). Основные материалы изложены на 109 страницах машинописного текста (146 страниц, включая приложения), в том числе содержат 23 таблицы, 54 рисунков, 105 библиографических наименования.

Во введении отображены актуальность и цель работы, обоснован объект и предмет исследования, а также представлены методы исследования, практическая значимость и реализация результатов, указана научная новизна.

В первой главе изучены производственно-технологические характеристики качества деталей из листового металла на основе анализа литературных источников, а также разработанных САЕ-программ. Уменьшение погрешностей в технологическом процессе приводит к повышению точности геометрических характеристик изделий и, следовательно, к улучшению качества производства в целом. ОСТ 92-1051-83 регламентирует основные параметры качества, такие как: шероховатость поверхности, Ra; точность геометрических размеров, мкм; отсутствие трещин, сколов, заусенцев.

Рассмотрены методы изготовления деталей из листового металла, указаны преимущества и недостатки. Для мелкосерийного производства целесообразнее использовать метод свободной гибки. Данный метод позволяет использовать для деталей различного профиля универсальный комплект инструмента, что влияет на уменьшение себестоимости производства.

Сложнопрофильные детали с наличием на них отверстий, которые в результате гибки могут изменять свою форму т.е. иметь отклонение от круглости. Параметр, отклонение от круглости, является основным показателем качества, получаемых отверстий в деталях из листового металла при гибке.

Стабильность технологического процесса гибки листового металла и качество изготавливаемых деталей тесно связаны с характеристиками поставляемого материала, который должен обладать однородным химическим составом, высокой пластичностью и отсутствием поверхностных и внутренних дефектов. Все это влияет на величину пружения детали (значение К-фактора), а также на круглость отверстий после гибки.

Рассмотрена существующая на предприятии стандартная последовательность проектирования технологического процесса гибки, что позволило выявить этапы проектирования, увеличивающие общую трудоемкость разработки техпроцесса. С целью

повышения автоматизации разработки технологического процесса и снижения влияния уровня компетенции технолога были проанализированы имеющиеся CAE-программы на предмет их использования.

С помощью программы QForm можно моделировать листоштамповочные операции, что позволяет выявить большинство дефектов, уменьшить количество брака, подобрать оборудование и оптимальный коэффициент использования материала. Данная программа требует значительных усилий и высокой квалификации при анализе несерийной продукции. Поэтому рекомендуется оценивать возможные разрывы и дефекты деталей, которые изготавливаются в крупносерийном и массовом производстве, где затраченное время на анализ оправдано. Программа Radbend предназначена для специализированного моделирования процесса гибки листового металла, выполнения расчетов разверток и программирования управляющего кода для станков с числовым программным управлением (ЧПУ). В ходе тестирования программы были обнаружены некоторые недостатки, такие как сложный интерфейс, отсутствие возможности добавления собственной оснастки и недостаточно высокий уровень технической поддержки. Программа Metamation Flux является CAD/CAM/CAE программой с удобным интерфейсом, с легкой наладкой библиотеки имеющейся оснастки, настраиваемыми отчетами. Программа может автоматически подбирать требуемый гибочный инструмент из библиотеки, назначать этапы гибки, рассчитывать позиционирование задних упоров, рассчитывать высокоточную развертку, учитывая геометрию выбранного инструмента, создавать управляющий код для станка с ЧПУ, анализировать возможные столкновения между деталью, инструментом и станком.

На основе полученных данных, предложена следующая методика разработки технологического процесса в следующей последовательности:

1. При получении конструкторского чертежа детали технолог проводит анализ на её технологичность, используя полученные номограммы.

2. С использованием программы Metamation Flux осуществляется автоматизированный расчет усилия гибки, подбирается необходимый набор инструмента, рассчитывается геометрия исходной заготовки (развертки), формируется операционная карта технологического процесса изготовления детали, проверяется наличие или отсутствие брака.

Преимущества предложенного метода:

1. Исключается необходимость в проведении тестовой гибки заготовки на листогибочном станке перед запуском в производство детали.

2. Сокращается время разработки технологического процесса свободной гибки, уменьшается трудоемкость, технологическая себестоимость, увеличивается производительность.

В результате проведенных экспериментальных исследований, и изучения влияния параметров процесса свободной гибки на качество деталей сложного профиля, получена база данных, позволившая усовершенствовать процесс проектирования и подготовки производства сложнопрофильных деталей методом свободной гибки.

Во второй главе изложены методика исследования, применяемые материалы, оборудование и используемые приборы. В качестве материала исследования были выбраны углеродистая Сталь 3 и нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Исследование проводилось на следующих толщинах: 0,5 мм, 0,8 мм, 1,0 мм, 1,2 мм, 1,5 мм, 2,0 мм.

Для проведения научного исследования была выбрана наиболее распространенная деталь, состоящая из двух отгибов (полок) под углом 90 градусов с расположенными на них отверстиями. На рисунке 1 представлена типовая детали, а на рисунке 2 представлена развертка листовой заготовки, где a – расстояние центра отверстия от линиигиба, d – диаметр отверстия, s – толщина детали. В ходе проведения экспериментов использовали заготовки различной толщины от 0,5 мм до 2,0 мм, расстояния центра отверстия от линиигиба изменяли в пределах 0-12 мм и диаметр отверстия варьировался от 1 до 10мм. В процессе опытной гибки было исследовано 2480 деталей. После проведения гибки на каждой детали изучали форму отверстия и измеряли его диаметр.



Рисунок 1- Типовая деталь

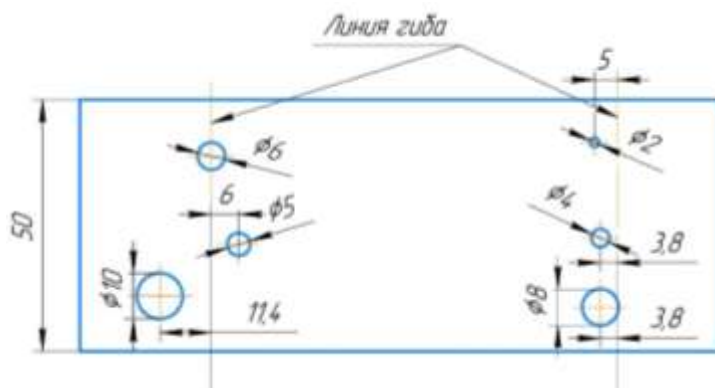


Рисунок 2 - Эскиз развертки исходной заготовки

Для получения качественных деталей при гибке имеет важное значение угол пружинения, который зависит от формы используемого инструмента. Для этого проводились исследования по влиянию ширины раскрытия матрицы на угол пружинения при гибке углеродистых и легированных сталей.

Угол матрицы и пуансона был выбран со значением 88° . При выборе ширины матрицы для гибки низкоуглеродистых сталей использовали рекомендации поставщиков оборудования в диапазоне от V6 до V24.

Гибка деталей проводилась на гидравлическом листогибочном прессе RICO PRCN 30100. Основные характеристики станка: номинальное усилие 1000 кН, рабочая длинагиба 3000 мм.

Контроль параметра качества отверстия (отклонение от круглости) проводился с помощью индикаторного нутромера повышенной точности ГТО НИ 2,5-10 0,001, специальными калибрами с регулируемым внутренним диаметром от 0,95 до 3 мм с шагом 0,001 мм. Контроль угла детали проводился с помощью цифрового угломера Ermenrich Verk DA40.

Была проведена оценка силы влияния основных факторов на получение бездефектных деталей с отверстием с использованием метода свободной гибки по плану ПФЭ 2^3 .

Первый полнофакторный эксперимент имел следующие основные факторы, влияющие на функцию отклика: расстояние от центра отверстия до линиигиба, диаметр отверстия, толщина металла. Функцией отклика является процентное отношение отклонения округлости к фактическому диаметру отверстия.

Второй полнофакторный эксперимент был построен с функцией отклика – угол пружинения. Основными факторами, оказывающими влияние на угол пружинения, для исследуемых материалов Ст3 и 12Х18Н10Т были выбраны: толщина заготовки, мм; раскрытие матрицы, мм; уголгиба, $^\circ$.

В третий главе приведены результаты экспериментальных и компьютерных исследований гибки сложнопрофильных деталей.

Целью экспериментальных исследований являлось изучение изменения геометрической формы (круглости) отверстий в зависимости от предельных расстояний расположения центра отверстий до линиигиба на детали.

Используя рекомендации ОСТ 92-1051-83 пункт 2.2.10 отверстие на детали при холодной штамповке нужно располагать на расстоянии согласно формуле 1 от внутренней поверхности полки (Рис. 3).

$$h \geq \left(R + 2s + \frac{d}{2} \right), \quad (1)$$

где R – радиус детали, s – толщина детали, d – диаметр отверстия.

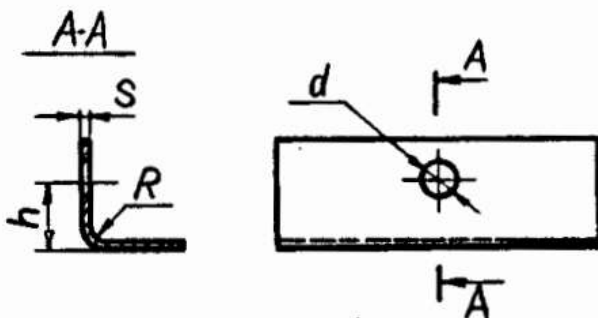


Рисунок 3 – Эскиз размеров для формулы 1

При расчете по данной формуле были получены неудовлетворительные результаты при моделировании в программе Metamotion Flux и при экспериментальной гибке на станке.

Так для расчета минимального расстояния отверстия от линиигиба для получения качественных деталей с диаметром отверстия 5 мм на толщине листа 0,5 мм по формуле $h \geq \left(0,5 + 2 \times 0,5 + \frac{5}{2} \right)$ получено, что $h \geq 4$ мм.

Моделирование операции 1 гибки детали с расположенной на одной из полок отверстия (Рисунок 3) с помощью программы Metamotion Flux показало, что при данных условиях деталь имеет дефект отверстия (Рисунок 4). Сопоставляя результаты, полученные при моделировании, и полученные экспериментальным путем при работе с этой же деталью, было отмечено, что в обоих случаях наблюдается дефект отверстия.

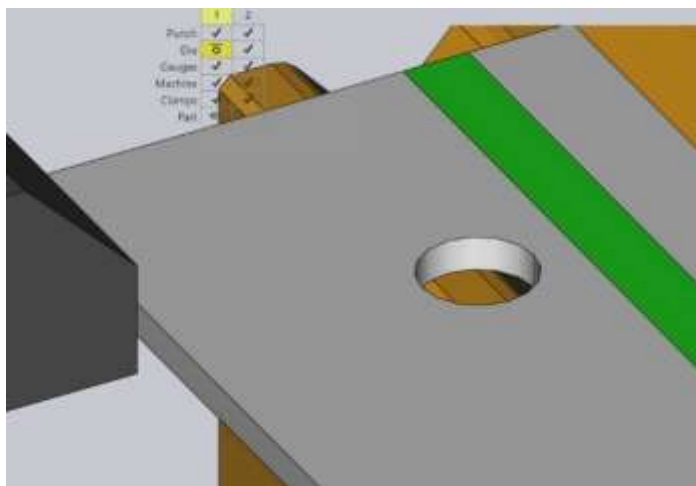


Рисунок 4 – Вид представления результата расчета операции 1 технологического процесса свободной гибки в программе Metamotion Flux для детали №830

Требование к качеству детали по форме отверстия регламентируется в соответствии ГОСТ 24643-81 «Допуски формы и расположение отверстий». С учетом требуемой степени точности ПТБ к изготавливаемым деталям с отверстиями, получаемых методом свободной

гибки, необходимо отметить, что такие детали будут считаться качественными, если получаемые отверстия будут иметь размеры в пределах: $\varnothing 1 \pm 0,003$ мм, $\varnothing 2 \pm 0,003$ мм, $\varnothing 3 \pm 0,004$ мм, $\varnothing 4 \pm 0,004$ мм, $\varnothing 5 \pm 0,004$ мм, $\varnothing 6 \pm 0,004$ мм, $\varnothing 7 \pm 0,004$ мм, $\varnothing 8 \pm 0,004$ мм, $\varnothing 9 \pm 0,004$ мм, $\varnothing 10 \pm 0,005$ мм. В противном случае, детали будут бракованными.

Поскольку было выбрано для исследования 2480 деталей, то нами было выполнено компьютерное моделирование в программе Metamotion Flux для всех деталей. Результаты гибки для всех исследуемых деталей приведены в виде номограмм в Приложении 2. Выборочные результаты опытов, рассмотренные в данной главе, сведены в Таблицу 1.

Таблица 1 – Качество исследуемых деталей с отверстием после гибки

Номер детали	Марка стали	Толщина детали, мм	Диаметр отверстия, мм	Расстояние центра отверстия от линиигиба, мм	Информация, выдаваемая программой
1	12X18H10T	0,5	1	0	искажение формы отверстия отсутствует
...					
9	12X18H10T	0,5	1	3,0	искажение формы отверстия имеется
...					
110	12X18H10T	0,5	7	3,2	искажение формы отверстия имеется
111	12X18H10T	0,5	7	3,6	искажение формы отверстия имеется
...					
208	Сталь 3	0,5	5	4,2	искажение формы отверстия имеется
...					
505	12X18H10T	0,8	5	0,8	искажение формы отверстия отсутствует
...					
830	Сталь 3	0,8	9	5,6	искажение формы отверстия имеется
...					
2480	Сталь 3	2,0	10	11,8	искажение формы отверстия отсутствует

Чтобы убедиться в правильности получаемых данных из программы Metamotion Flux, было проведено моделирование процесса гибки исследуемой детали №110 в программе Solid Works Simulation. По результатам расчетов построены эпюры напряженно-

деформированного состояния участков, близлежащих к отверстию детали. При этом были выбраны следующие параметры детали: толщина листа 0,5 мм, диаметр отверстия 7 мм, 12X18Н10Т, положение центра отверстия от линиигиба 3,2 мм.

На рисунках 5, 6, 7 приведены результаты расчета Solid Works Simulation.

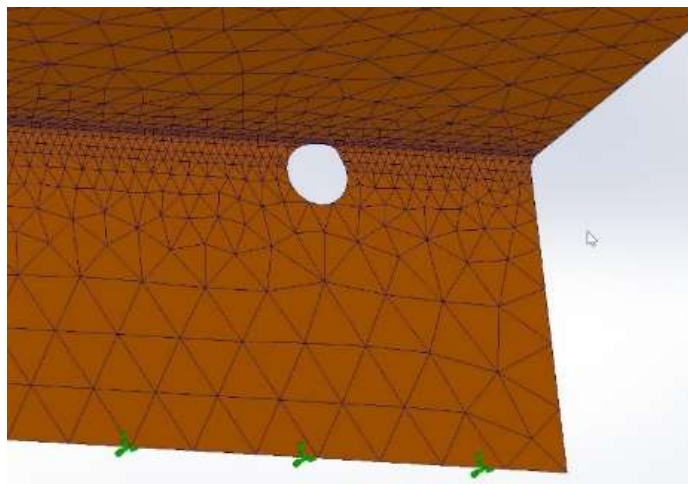


Рисунок 5 – Сетка оболочки с использованием срединных поверхностей

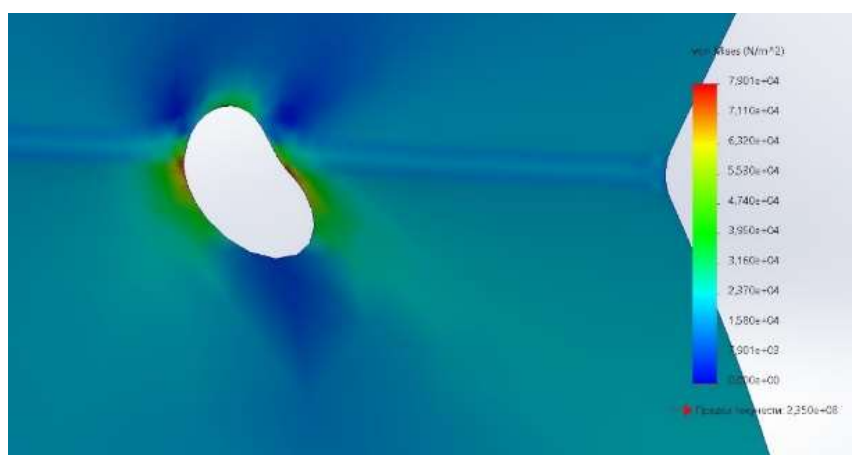


Рисунок 6 – Нелинейное статическое напряжение

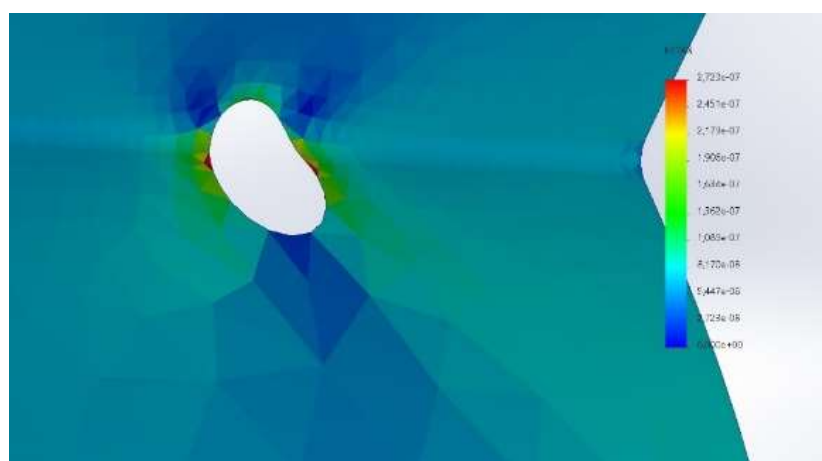


Рисунок 7 – Нелинейная статическая деформация

Установлено, что изменение формы отверстия имеют место в том случае, когда растягивающие напряжения не уравновешены сжимающими.

На основе экспериментальных исследований по определению областей, определяющих бездефектные и дефектные детали при свободной гибке, и по полученным результатам были построены номограммы, которые устанавливают технологические возможности получения деталей с отверстиями при свободной гибке в зависимости от расположения отверстия до линиигиба, диаметра отверстия, толщины заготовки и марки стали. На Рисунке 8 показана одна из построенных номограмм.

Получены уравнения регрессии, позволяющие определить расположения центра отверстия относительно линиигиба на полке детали и обеспечивающие выполнить прогноз условий получения качественных изделий.

Условие получения отверстий с дефектами после гибки:

$$S_1 \leq S \leq S_2$$

Уравнения регрессии для деталей толщиной 0,5 мм из стали 3 и 12X18H10T имеют вид в натуральных переменных:

$$S_1 = -0.8267 + 0.4558d$$

$$S_2 = 3.04 + 0.3709d$$

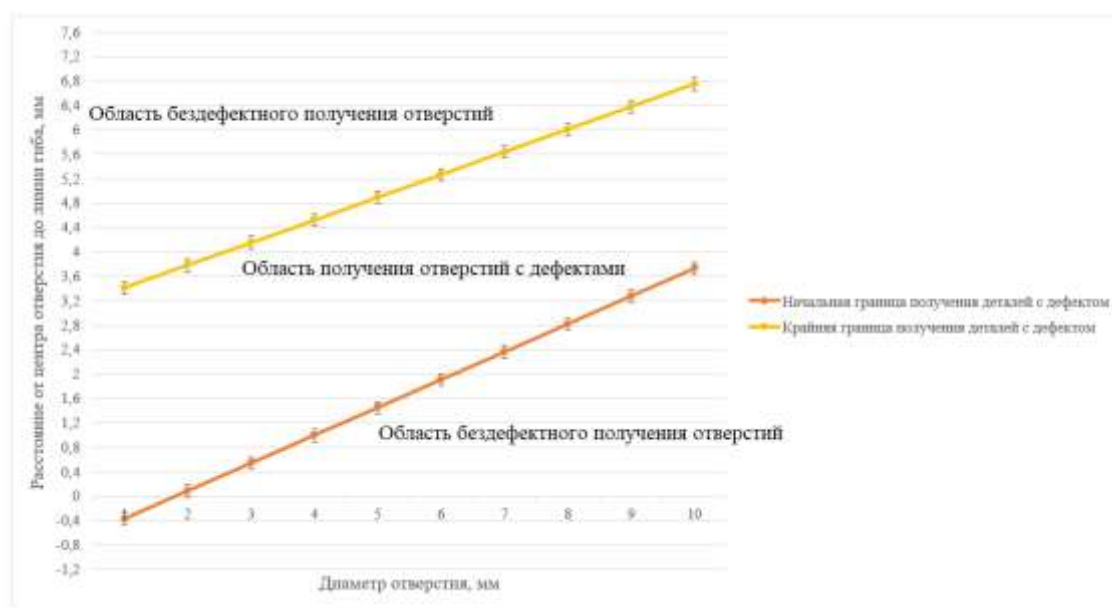


Рисунок 8 - График определения качества деталей при свободной гибке в зависимости расстояния расположения отверстия от линиигиба и диаметра отверстия. Сталь 3 и 12X18H10T с толщиной листовой детали 0,5 мм

Разработаны практические рекомендации по выбору и проектированию сложнопрофильных деталей с использованием номограмм, определяющих области

бездефектных и дефектных деталей, позволяющих оценить возможность образования дефектов отверстий при свободной гибке.

Составлен план вычислительного эксперимента для поиска оптимальных параметров производственных процессов, влияющих на качество получаемых деталей с отверстием. Разработана математическая модель расчета отклонений от круглости отверстий при свободной гибке в зависимости от диаметра отверстия и его расположения (расстояния) относительно линиигиба.

Проведена оценка эффективности влияния основных факторов на получение бездефектных деталей с отверстием с использованием метода свободной гибки. Факторами влияния на функцию отклика были выбраны расстояние от центра отверстия до линиигиба, диаметр отверстия и толщина металла. Для этого произведена кодировка переменных, составлена матрица планирования эксперимента, вычислены уравнения регрессии, проведена проверка уравнения на адекватность.

В нашем случае функцией отклика является процентное отношение отклонения округлости к фактическому диаметру отверстия, $(\Delta T/d_o) \%$.

Уравнение регрессии в кодированных переменных (2):

$$Y = 2,25 - 1,98x_1 - 1,98x_2 + 1,8x_{12}, \quad (2)$$

где $x_1 = \frac{l-6.1}{0.2}$, $x_2 = \frac{d-5.5}{1}$.

Уравнение регрессии в натуральных переменных (3)

$$\square T/d_o = 85,6 - 11,9l - 3,9d + 0,362ld \quad (3)$$

На основе полученных данных построена поверхность по массиву (Рис. 9).

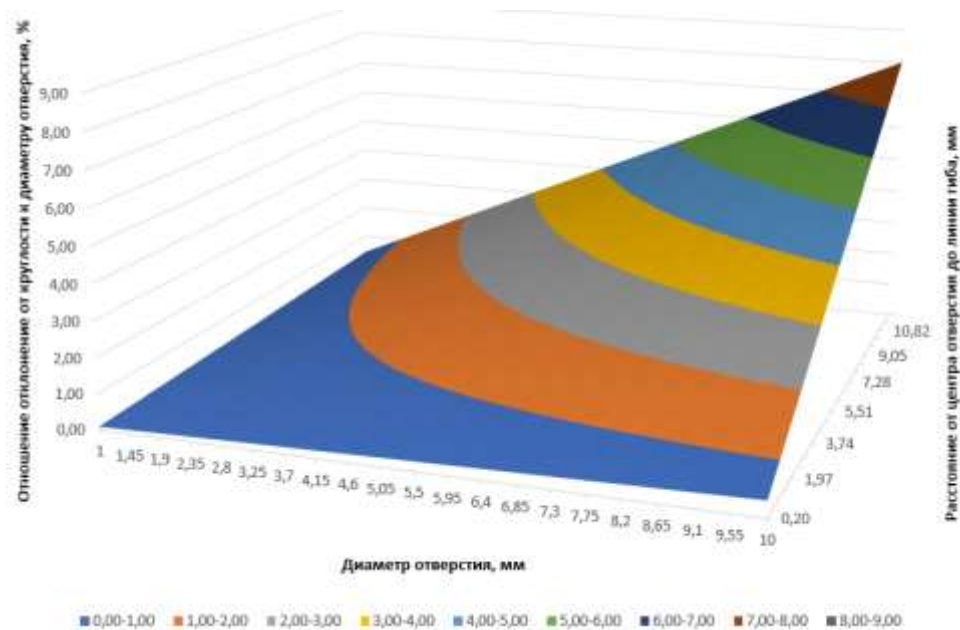


Рисунок 9 - Поверхность по массиву для уравнения в кодированных величинах

$$Y = 2,25 - 1,98x_1 - 1,98x_2 + 1,8x_{12}$$

Полученная математическая модель показывает, что наибольшее влияние на получение качественных изделий оказывает расстояние от центра отверстия до линиигиба.

Учитывая особенности процесса свободной гибки, необходимо было провести научное исследование по влиянию геометрической формы рабочего инструмента на размеры исходной заготовки. Ключевым фактором расчета точных размеров развертки является определение соотношения между расстоянием от нейтральной линии изгиба до внутреннего радиусагиба и толщиной материала, которое влияет на длину развертки (*K*-фактора). Для получения данных о *K*-факторе были проведены испытания гибки одинаковых деталей на двух разных ширинах раскрытия матрицы. В исследовании использовались следующие материалы и толщины: Сталь 3: 0,5; 0,7; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 12Х18Н10Т: 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5.

В работе экспериментальным путем установлена зависимость *K*-фактора от ширины раскрытия матрицы, а также рассчитаны значения *K*-фактора в зависимости от толщины исходной заготовки, марки стали.

Для получения корректных расчетных размеров исходной заготовки следует учитывать участок в области наличия растягивающих напряжений, прилегающий к линиигиба. Одним из способов расчета является способ вычета участка растяжения из габаритных размеров двух прилегающих полок (Рис. 10)

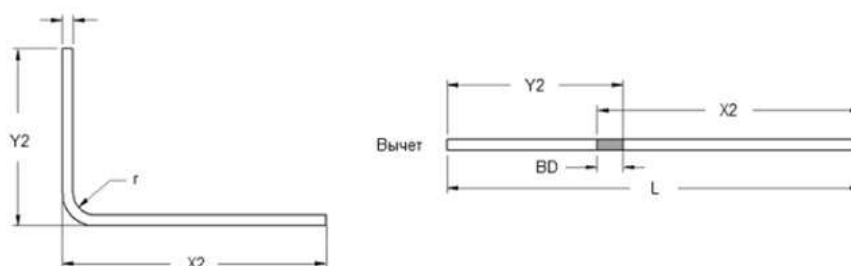


Рисунок 10. Эскиз для расчета развертки листовой детали

Теоретический расчет участка BD проводился по формуле (4)

$$BD = 2\left(tg\left(\frac{\varphi}{2}\right)(r - s) - \frac{\pi \times \varphi}{180}(r + k \times s)\right) \quad (4)$$

Опытным путем был определен участок BD и из формулы 4 был рассчитан *K*-фактор для каждого опытного образца

На основе полученных данных построены графики зависимости *K*-фактора, найденного опытным путем от толщины металла, и с учетом материала (Рис. 11 и 12).

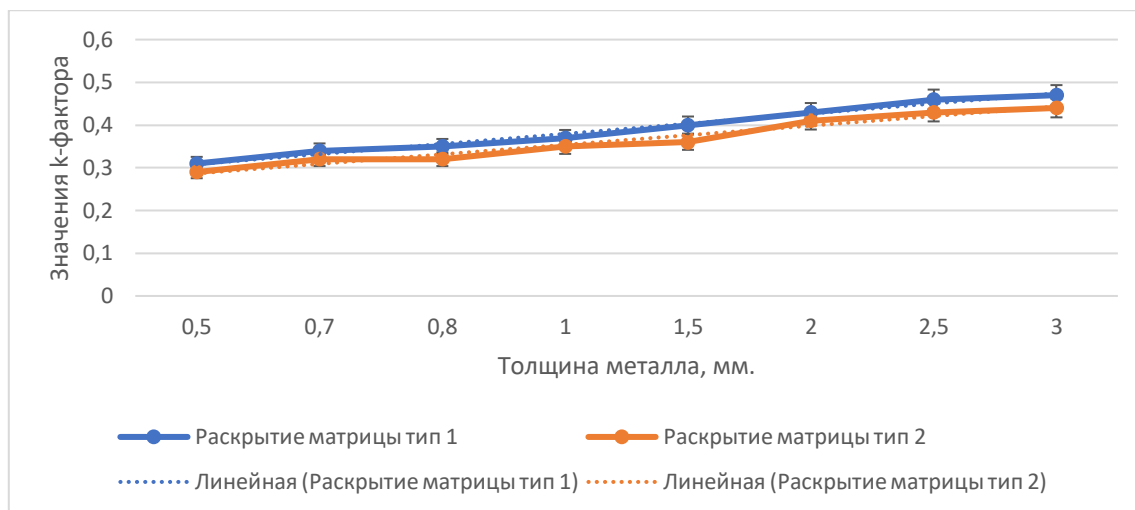


Рисунок 11 – График зависимости K -фактора от толщины металла для стали 3

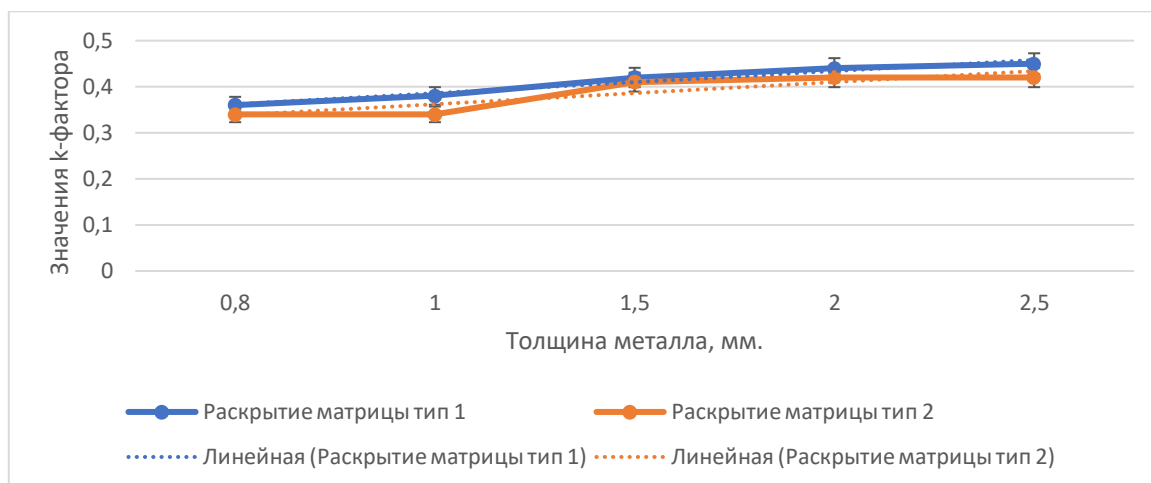


Рисунок 12 – График зависимости K -фактора от толщины металла для стали 12X18H10T

Таким образом, при использовании уточненного K -фактора в расчетах размеров листовой заготовки появилась возможность изготавливать детали в пределах 4-5 качества точности без проведения предварительного этапа гибки.

При изготовлении деталей из листового металла методом свободной гибки возникает трудность, связанная с изменением углагиба после снятия нагрузок. Угол изогнутой детали изменяется относительно заданного угла в нулевой точке из-за энергии, сохраненной в процессе гибки (остаточные напряжения). Этот процесс может быть описан как эффект пружинения. Для достижения высокого качества изогнутых деталей необходимо предварительно учесть эффект пружинения, прибавляя компенсационный угол к желаемому значению угла гибки в процессе изготовления.

Поскольку пружинение оказывает прямое влияние на получение бездефектных деталей из листового металла, было проведено дополнительное экспериментальное исследование по определению факторов, влияющих на пружинение детали.

Для проведения полнофакторного эксперимента исследование состояло из 4х этапов, в которых менялись факторы влияющие на пружинение для исследуемых материалов СтЗсп и 12Х18Н10Т:

1. Толщина заготовки, мм
2. Раскрытие матрицы, мм
3. Уголгиба, °
4. Направление волокон листовой заготовки относительно линиигиба

Результаты представлены в виде уравнений регрессий, позволяющих оценить силу влияния факторов и эффект их взаимодействия. На основе полученных линейных моделей процесса свободной гибки построены объемные поверхности по массиву для наглядного представления об изменении угла пружинения с учетом эффектов взаимодействия влияющих факторов на него (Рисунки 13-16).

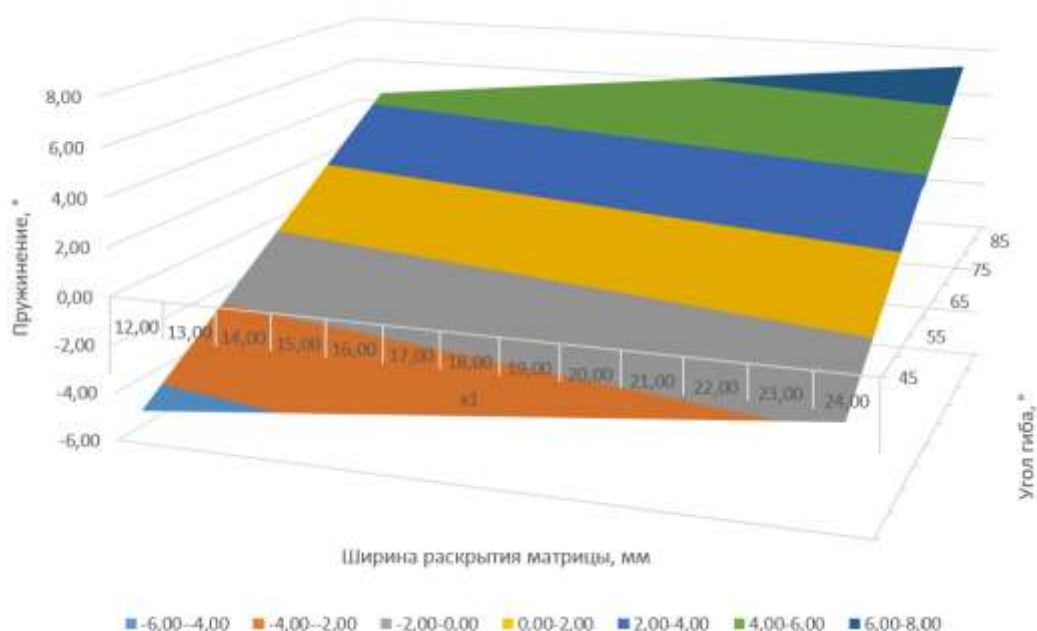


Рисунок 13 – Поверхность по массиву влияния ширины раскрытия матрицы, углагиба деталей из СтЗсп на угол пружинения при гибке заготовки, вырезанной вдоль волокон $\Delta\alpha_1 = -16,48 + 0,238V + 0,2\alpha$

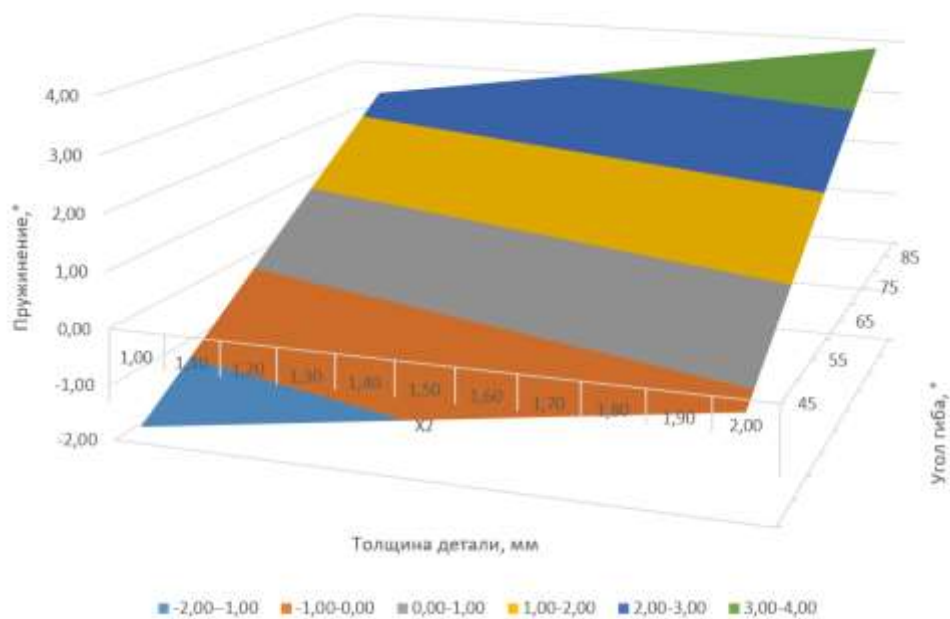


Рисунок 14 - Поверхность по массиву влияния ширины раскрытия матрицы, углагиба деталей из 12X18Н10Т на угол пружинения при гибке заготовки, вырезанной вдоль волокон $\Delta\alpha_2 = -7,25 + 1,5t + 0,09\alpha$

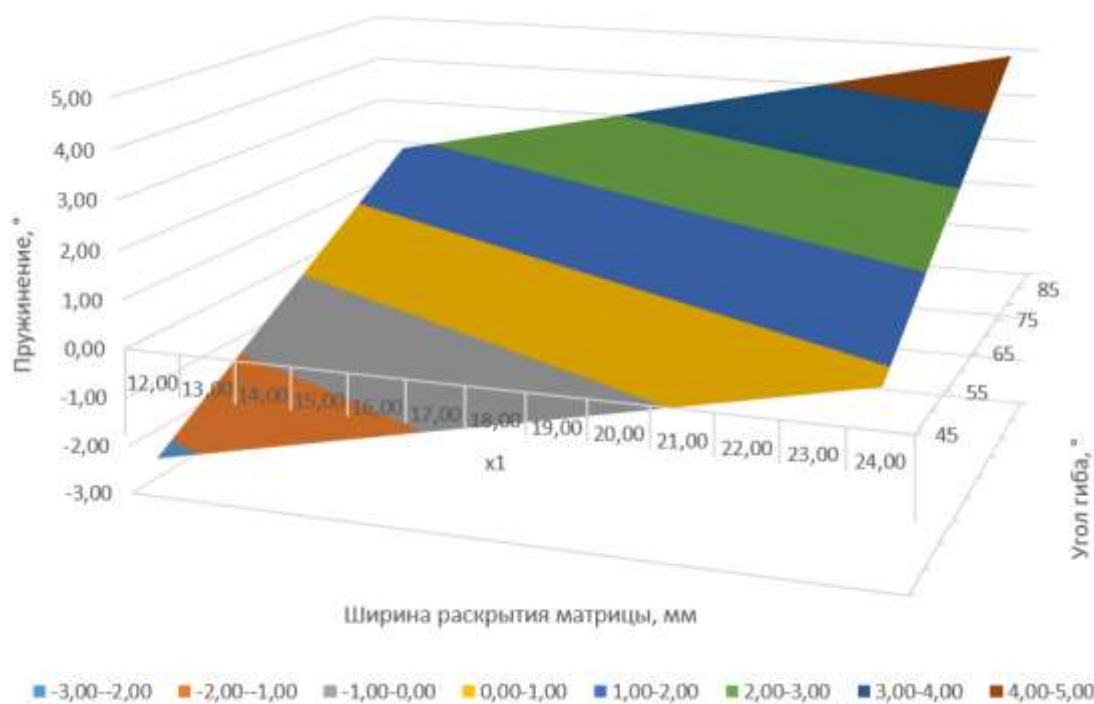


Рисунок 15 - Поверхность по массиву влияния ширины раскрытия матрицы, углагиба деталей из СтЗсп на угол пружинения при гибке заготовки, вырезанной поперек волокон $\Delta\alpha_3 = -9,25 + 0,25V + 0,09\alpha$

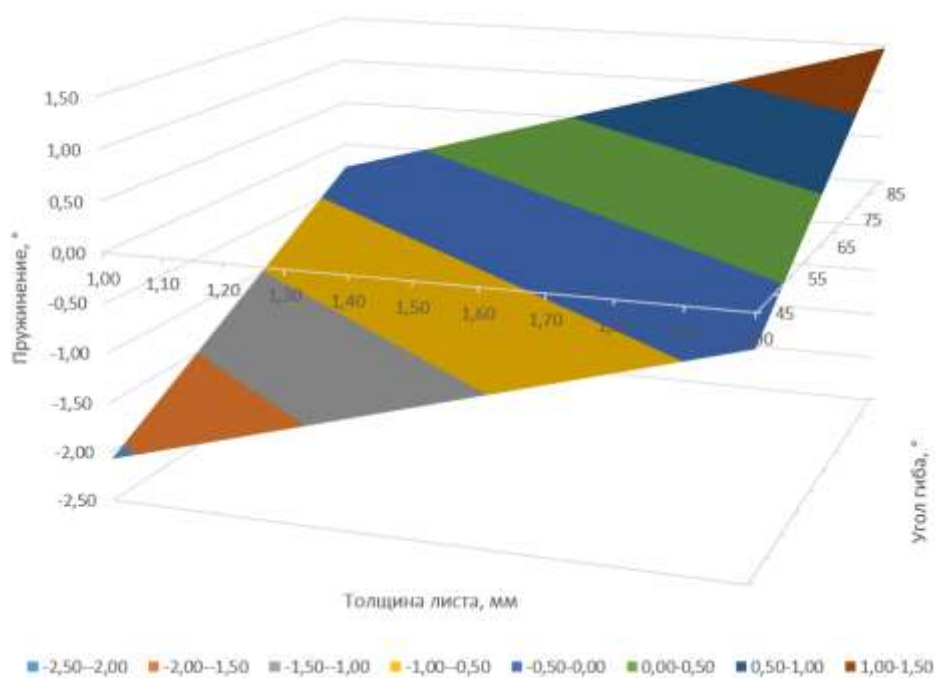


Рисунок 16 - Поверхность по массиву влияния ширины раскрытия матрицы, угла гиба деталей из 12X18H10T на угол пружинения при гибке заготовки, вырезанной поперек волокон $\Delta\alpha_4 = -5,625 + 1,75t + 0,04\alpha$

Анализ полученных уравнений регрессий показал, что при гибке деталей из Ст3сп основное влияние на пружинение детали после снятия напряжений оказывают раскрытие ширины матрицы и требуемый угол гиба.

Установлено, что при изготовлении деталей из 12X18H10T основное влияние на пружинение детали после снятия напряжений оказывают толщина детали и требуемый угол гиба.

Также на основе полученных результатов можно удостовериться, что если линия гиба совпадает с направлением проката, угол пружинения будет минимальным.

В четвертой главе приведены практические рекомендации и алгоритм разработки усовершенствованного технологического процесса сложнопрофильных деталей свободной гибкой.

В целях производства качественных изделий и повышения автоматизации процесса гибки деталей с различными конструктивными, но общими технологическими признаками, необходимо при проектировании группового технологического процесса обеспечить установленные параметры для конкретного случая, а именно: центр отверстия с требуемым диаметром расположить на расстоянии от линии гиба на конкретной толщине металла, обеспечивающей получение бездефектной формы отверстия, учитывать ширину раскрытия матрицы и направление волокон проката для компенсации пружинения в металле .

Несмотря на обширное количество исследований процесса гибки листового металла, до сих пор не получилось полностью автоматизировать процесс создания технологического процесса, исключающего получения бракованных деталей. Ниже описан комплекс решений, которые позволяют преодолеть технологические трудности и получить высококачественные детали из листового металла, получаемые методом свободной гибки.

Целью совершенствования структуры организации производства является установление закономерностей взаимодействия между производственными подразделениями для формирования корректного технологического процесса, направленного на устранение дефектной продукции и предварительную отработку оператором детали на технологичность.

Проведение исследований позволило создать новый подход к организации производственных процессов с учетом новых технологических методов, включая автоматизацию и использование современной электронно-вычислительной техники.

С целью оптимизации производственного процесса, апробации исследования и внедрения в производство определены основные этапы разработки технологического процесса гибки детали с использованием CAD/CAE программ.

На основании проведенных научно-экспериментальных исследований предложен алгоритм разработки технологического процесса свободной гибки сложнопрофильных деталей. Алгоритм разработки технологического процесса с учетом использования CAE-системы, как дополнительный модуль к стандартному алгоритму проектирования технологического процесса гибки выделен окружностью на Рисунке 17.

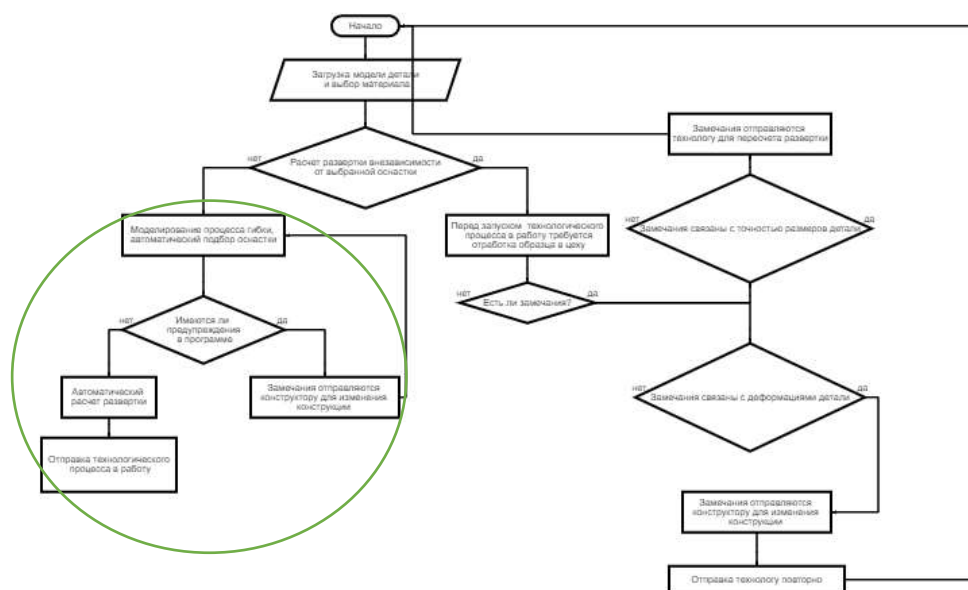


Рисунок 17 - Алгоритм разработки технологического процесса с применением CAE-систем и по стандартному способу

Проектирование технологического процесса по усовершенствованной методике и подготовке производства сложнопрофильных деталей свободной гибкой по предложенному алгоритму, как показал опыт, менее трудоемкий и более производительный.

При усовершенствовании процесса свободной гибки следует учитывать причины возникновения рисок и царапин на детали после гибки. Риски и царапины после гибки появляются на деталях из нержавеющей стали и алюминия из-за трения об инструмент из металла, что добавляет эстетический дефект. Во избежание получения подобных дефектов на сложнопрофильных деталях был разработан специальный инструмент.

В данной работе была предложена конструкция, спроектирована и изготовлена комбинированная матрица. Она состоит из металлической державки, а рабочая часть выполнена из высокопрочного конструкционного полимера Римамида. На Рисунке 18 представлена фотография комбинированного инструмента (матрицы) в сборе.

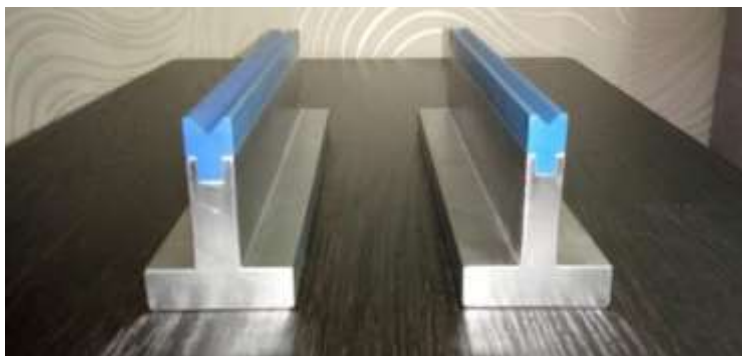


Рисунок 18 – Комбинированный инструмент для гибки изделий сложного профиля.

Сравнивая срок работы до износа инструмента традиционного с комбинированным при свободной гибке, исследуемых деталей, установлено, что комбинированный инструмент со вставками из Римамида, имеет ресурс работы, сравнимый с инструментом из стали 38ХМ. Но при этом, комбинированный инструмент дешевле в 4 раза, весит в несколько раз меньше инструмента традиционного.

На Рисунке 19 приведена фотография конечного изделия после изготовления с применением комбинированного инструмента.

Экономическая эффективность от внедрения усовершенствованной технологии проектирования технологического процесса сложнопрофильных деталей методом свободной гибки с использованием программы Metamotion Flux свидетельствует о том, что величина годового экономического эффекта в виде снижения затрат составит 1 224 тыс. руб. при затратах на мероприятие 968 тыс. руб. в первый год работы.



Рисунок 19 – Поверхность изделия, полученного с помощью комбинированного инструмента

По прогнозу данный проект окупится через 324 дня, рентабельность инвестиций в расчете на 5 лет составит 470 %. Всё это позволяет сделать вывод об экономической целесообразности внедрения предложенного проекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель расчета значения отклонения от круглости отверстия при свободной гибке в зависимости от диаметра отверстия и его расположения (расстояния) относительно линиигиба. Полученные уравнения регрессии, позволяют прогнозировать технологические условия производства деталей сложного профиля, исключая возможность образования дефектов при свободной гибке.
2. Установлены закономерности влияния толщины металла заготовки, ширины раскрытия матрицы, марки стали, диаметра отверстия и его расположения относительно линиигиба на качество и точность размеров детали.
3. Разработана усовершенствованная технология и методика проектирования технологического процесса свободной гибки с учетом отработки конструкции детали на технологичность. Элемент методики по отработке конструкции детали на технологичность включен, как дополнительный модуль в программу Metamotion Flux.
4. Разработаны практические рекомендации по проектированию сложнопрофильных деталей и выбору технологических условий свободной гибки с использованием номограмм, которые дают возможность предварительно определить область получения бездефектных и дефектных деталей.
5. Разработана новая методика проектирования технологического процесса свободной гибки деталей сложной формы, которая была апробирована на производстве ООО

“Промышленные Партнёры” г. Санкт-Петербург. Экономический эффект от внедрения составил 1 224 тыс. руб.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК РФ:

1. Левашова Е.Л. Повышение точности размеров сложнопрофильных изделий из листового металла методом свободной гибки/ Е.Л. Левашова, М.М. Радкевич, М.В, Яковицкая // Наука и бизнес. Пути развития. – 2022. – № 7(133) . – С. 161-165.

2. Левашова Е.Л. Качество тонколистовых деталей с отверстиями относительно линиигиба / Е.Л. Левашова, М.М. Радкевич, В.П. Третьяков // Наука и бизнес. Пути развития. – 2023. – № 1(139) . – С. 85-89.

Публикации в изданиях, рецензируемых РИНЦ:

1. Левашова Е.Л. Разработка технологической оснастки для гибки сложнопрофильных деталей / Е.Л. Левашова, М.М. Радкевич, М.В, Яковицкая // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России: сборник научных трудов/ под ред. д-ра техн. наук, проф. А.А. Попович. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С 151-154

2. Левашова Е.Л. Получение качественных изделий с отверстиями при свободной гибке листового материала / Е.Л. Левашова, М.М. Радкевич, М.В, Яковицкая // Перспективные машиностроительные технологии: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 68-72.

3. Левашова Е.Л. Повышение качества сложнопрофильных изделий из листового металла методом свободной гибки / Е.Л. Левашова, М.М. Радкевич, М.В, Яковицкая // Инновационные идеи в машиностроении: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, 24–26 мая 2022 г. / под ред. д-ра техн. наук, проф. А. А. Поповича, д-ра техн. наук, проф. Д. П. Гасюка. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С 385-390

4. Е.Л. Левашова Влияние ширины раскрытия матрицы на размер исходной заготовки при свободной гибке // Инновационные идеи в машиностроении: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, 27–30 ноября 2023 г. – СПб.:ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. С. 147-152