

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС»

На правах рукописи

КАРФИДОВ АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СТУПЕНЧАТОЙ
ТОНКОЛИСТОВОЙ ГИБКИ И УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ
ИНСТРУМЕНТА ЛАЗЕРНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ С ЦЕЛЬЮ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА**

Специальность 2.5.7 – «Технологии и машины обработки давлением»
Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Кобелев Олег Анатольевич

Москва – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	13
1.1 Классификация операций листовой штамповки	13
1.2 Анализ современных технологических процессов гибки тонких металлических листов	19
1.3 Обоснование выбора ступенчатой гибки тонколистовой стали.....	22
1.4 Технологический инструмент ступенчатой гибки	27
1.4.1 Общие сведения.....	27
1.4.2 Материалы технологического инструмента	33
1.4.3 Термообработка инструмента листогибочных прессов	36
1.4.4 Конструктивные элементы гибочного инструмента	37
Выводы по главе 1	39
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТУПЕНЧАТОЙ ГИБКИ ТОНКОЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА	43
2.1 Основы ступенчатой гибки тонколистовых материалов.....	43
2.2 Влияние числа ступеней гибки на точность получаемого профиля	46
2.3 Определение хода пуансона при ступенчатой гибке	50
Выводы по главе 2	68
ГЛАВА 3. ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА СТУПЕНЧАТОЙ ГИБКИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ	70
3.1 Технологические факторы лазерного упрочнения.....	70
3.2 Исследование структуры слоя, подвергнутого лазерной закалке	76
3.3 Анализ математических моделей глубины зоны лазерной закалки	79
3.4 Математическое планирование эксперимента.....	81
3.5 Лазерная закалка технологического инструмента для обработки металлов давлением.....	85
3.6 Экспериментальное исследование лазерной обработки стали X12M.....	92
3.7 Метод контроля геометрических параметров инструмента после процесса лазерной закалки.	100
Выводы по главе 3	108

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ СТУПЕНЧАТОЙ ГИБКИ	112
4.1 Прототипирование технологии ступенчатой гибки тонкостенных корпусов.....	112
4.2 Применение ступенчатой гибки для прототипирования бампера стерилизатора	118
4.3 Импортозамещение рабочего инструмента листогибочного прессы <i>Coastone cone 900</i>	121
Выводы по главе 4	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	132
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ	145
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ В. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ИЗДЕЛИЙ	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Обеспечение технологического суверенитета страны тесно связано с техническим прогрессом и повышением производительности труда в машиностроении, что обеспечивается комплексной механизацией и автоматизацией технологических процессов, поиском и внедрением эффективных методов и средств производства.

Значительную долю в машиностроительном производстве занимают тонкостенные элементы, изготавливаемые из листового проката. К тонкостенным относят детали, для которых толщина существенно меньше других геометрических параметров, например, длины и ширины. В проведённых исследованиях основное внимание уделяется корпусным элементам, выполненным из листовых материалов на основе малоуглеродистых и нержавеющей сталей, с диапазоном толщин $s = 0,5-5,0$ мм и радиуса гибки $R = 10-100$ мм.

В общем объеме машиностроительного производства значительное место занимают тонкостенные детали, выполненные из листового проката. Под тонкостенными деталями понимают детали, у которых толщина намного меньше других размеров (ширины и длины). В наших исследованиях и разработках преимущественно рассматриваются корпусные детали, изготовленные из листовых малоуглеродистых и нержавеющей сталей с радиусом гибки и толщиной

Прогрессивным методом изготовления тонкостенных металлических деталей является холодная листовая штамповка, которая представляет собой разновидность обработки давлением, основанной на получении формы деталей путем необратимой пластической деформации заготовок. Холодная штамповка позволяет широко механизировать и автоматизировать процесс формообразования, благодаря чему достигается высокая производительность труда и низкая себестоимость изделий. Также при штамповке повышается коэффициент использования металла по сравнению с обработкой резанием.

Изделия сложной конфигурации из листового металла формируются, как правило, либо путём сварки предварительно изогнутых деталей простого профиля,

либо посредством гибки с использованием специализированной технологической оснастки. В отличие от сварных конструкций, детали, полученные методом гибки, обладают более высокой точностью и эксплуатационной надёжностью, поскольку в них отсутствуют характерные для сварных изделий термически обусловленные дефекты. По этой причине гибка рассматривается как один из наиболее эффективных способов получения тонкостенных металлических деталей. В ходе неё под действием пластической деформации происходит изменение взаимного расположения отдельных элементов детали, а при необходимости формообразование цилиндрических и конических поверхностей.

К числу прогрессивных методов гибки листового металла относится свободная гибка, особенностью которой является использование универсального инструмента, обеспечивающего изготовление изделий с различной геометрией без необходимости частой переналадки оборудования. Это способствует снижению производственных затрат и расширению номенклатуры выпускаемой продукции в части профиля.

Поэтому исследование и применение технологических процессов гибки для производства тонкостенных металлических деталей остается актуальным на предприятиях различных отраслей экономики страны.

Степень разработанности проблемы. Методы получения деталей путем пластической деформации заготовок непрерывно совершенствуются и развиваются. Этому способствует творческое сотрудничество ученых и работников производства.

Развитие теоретических основ и совершенствование технологических процессов листовой штамповки стало результатом многолетних исследований и практических разработок ведущих специалистов. Среди них существенный научный и методологический вклад в формирование современной школы листовой штамповки внесли отечественные учёные С. И. Губкин, Л. А. Шофман, А. Д. Томленов, М. Н. Горбунов, Е. А. Попов, И. П. Ренне, М. Н. Лысов, Е. Н. Мошнин, В. П. Романовский, С. П. Яковлев и другие, а также зарубежные

специалисты E. Siebel, E. G. Thomsen, S. Kobayashi, Z. Marciniak, W. Johnson, S. Benson и другие.

Гибка листового металла представляет собой низкоотходный метод обработки металла давлением с высокой технологической отдачей, направленный на получение деталей различной формы, в том числе пространственно сложных деталей.

Современные направления развития технологий гибки листового металла ориентированы на повышение точности размеров и качества деталей, а также на снижение производственных затрат при сохранении высокой производительности процесса. В связи с этим всё более широкое распространение получает метод свободной гибки с применением универсального инструмента, позволяющий изготавливать изделия различной формы. При этом при производстве тонкостенных деталей с дугообразными элементами эффективным технологическим решением является использование ступенчатой (или шаговой) гибки.

В большинстве опубликованных работ подробно изложены основные особенности ступенчатой гибки и показано влияние условий деформирования на силовые показатели при холодной гибке металлических полос, которые используются в методах расчета и проектирования технологий и систем автоматизации процесса гибки. Однако, влияние изменения количества ступеней на точность полученного дугообразного профиля, исследовано недостаточно подробно.

В отличие от ступенчатой гибки, при выполнении V-образной гибки практически все виды используемого инструмента заметно воздействуют на поверхность заготовки, что приводит к вмятинам, царапинам и нарушениям структуры поверхностного слоя. Как правило, такой результат считается допустимым, однако увеличение радиуса наконечника пуансона может существенно снизить выраженность дефектов. В тех случаях, когда недопустимо даже минимальное повреждение поверхности, например при обработке предварительно окрашенных, полированных или анодированных листов,

целесообразно применение упругих деформируемых вставок из эластомерных материалов (резины, нейлона и др.): они предотвращают появление царапин. Гибка листового материала без царапин имеет особое значение при изготовлении критически важных деталей авиационной и аэрокосмической техники, что связано с необходимостью визуального различия царапин и зарождающихся трещин. Для исключения повреждения поверхности заготовки необходимо, чтобы максимальные контактные напряжения, создаваемые пуансоном, не превышали предельно допустимого значения напряжения смятия. В некоторых источниках даются общие соображения о выборе радиуса наконечника пуансона, но отсутствуют конкретные зависимости по его выбору.

В настоящее время наиболее широко используемым материалом для производства листогибочных инструментов являются углеродистые и легированные стали. В зарубежной практике часто применяется сталь 42CrMo — это высокопрочная легированная сталь, которая прошла закалку и отпуск для получения высокой прочности и ударной вязкости. Из отечественных материалов наибольшее распространение для изготовления пуансонов и матриц листогибочных прессов получили инструментальные углеродистые (типа У8А) и низколегированные (типа Х12М) стали. Для улучшения механических характеристик технологический инструмент листогибочного пресса подвергается термической обработке, основным видом которой являются различные виды закалки. Анализ литературных данных показывает, что для повышения эксплуатационных свойств технологического инструмента ступенчатой гибки эффективно применить методы лазерного упрочнения, но это требует проведения теоретических и экспериментальных исследований.

Объект исследования — технологический процесс ступенчатой гибки тонколистовой стали для получения деталей сложного профиля.

Предмет исследования — качество деталей сложного профиля (отклонение от заданного профиля, отсутствие вмятин) и эффективность процесса изготовления деталей сложного профиля при ступенчатой гибке.

Цель работы: повышение эффективности ступенчатой гибки тонколистовой стали путем выбора рациональных параметров процесса на основе разработанной методики расчета и повышение эксплуатационной стойкости технологического инструмента методом лазерного упрочнения.

Для достижения цели исследования требуется решение комплекса **научно-технических задач**.

1. Выполнять сравнительный анализ эффективности современных технологических процессов гибки тонких металлических листов и обосновать выбор ступенчатой гибки для изготовления дугообразных элементов корпусов различных приборов и изделий индивидуального и мелкосерийного производства.

2. Уточнить зависимости для расчета основных параметров ступенчатой гибки тонколистовых материалов и оценить влияние количества ступеней на точность получаемого дугообразного профиля. Разработать методику расчета основных технологических параметров процесса ступенчатой тонколистовой гибки.

3. На основе изучения современных конструкций технологического инструмента листогибочных прессов дать рекомендации по выбору отечественных материалов для изготовления пуансонов и матриц и обосновать перспективность использования лазерного упрочнения для повышения износостойкости их рабочих поверхностей и увеличения эксплуатационного ресурса.

4. Провести экспериментальные исследования воздействия лазерного излучения на глубину закаленного слоя штампов, изготовленных из углеродистой и легированных инструментальных сталей и разработать рекомендации по технологии лазерной обработки инструмента ступенчатой гибки тонколистовой стали.

5. Использовать полученные результаты для разработки и внедрения рациональных режимов ступенчатой гибки тонколистовых материалов, обеспечивающих получение дугообразных элементов конкретных деталей и повышение ресурса рабочего инструмента.

Методы исследований опираются на фундаментальные принципы теории обработки металлов давлением, а также на положения теории и технологии холодной листовой штамповки. Теоретический анализ процессов деформирования выполнен с использованием положений механики сплошной среды, теории упругости и теории пластического деформирования. Экспериментальные исследования проведены на гидравлическом листогибочном прессе с применением экспериментальной гибочной оснастки и стандартных измерительных приборов, при этом обработка полученных данных осуществлялась с применением общепринятых методов математической статистики.

Научная новизна работы.

1. Установлена зависимость между углом гибки ступени и относительным ходом пуансона (глубиной его погружения в матрицу) при свободной гибке. Полученная зависимость использована при определении оптимальных параметров ступенчатой гибки, применяемой при производстве тонкостенных корпусных деталей.

2. Выведено выражение для расчёта минимально допустимого радиуса наконечника пуансона, при котором исключается смятие контактной поверхности заготовки в процессе гибки. Полученные результаты использованы при разработке технологий ступенчатой гибки тонколистового металла из малоуглеродистых и нержавеющей сталей.

3. Предложена модель стойкости лазерно-упрочненного штампового инструмента, которая использована для разработки и оптимизация режимов лазерной закалки без оплавления поверхности технологического инструмента ступенчатой гибки с целью повышения его усталостной прочности.

4. Впервые, после математической обработки результатов экспериментального исследования лазерного поверхностного упрочнения образцов из инструментальной стали X12M и легированной конструкционной стали 40XH2MA, получены формулы для оценки глубины лазерно-закаленного слоя при заданных значениях мощности лазерного излучения и скорости перемещения лазерного луча

5. Комплекс экспериментальных исследований влияния параметров лазерного излучения на глубину закаленного слоя штампов, изготовленных из углеродистых и легированных инструментальных сталей У8, 40ХН2МА, 5ХВ2С, 9ХС и Х12М.

Практическая значимость и реализация работы.

1. Разработана и успешно опробована на практике методика расчета технологических параметров ступенчатой гибки тонколистовых стальных деталей корпусов ряда изделий индивидуального и мелкосерийного производства, что позволило сократить время на их прототипирование и снизить производственные затраты.

2. Подготовлены учебно-методические материалы для проведения учебных занятий с использованием действующего оборудования кафедры инжиниринга технологического оборудования МИСИС, которые используются в учебном процессе по направлениям подготовки 15.03.02 и 15.04.02 «Технологические машины и оборудование».

3. Результаты экспериментальных исследований лазерного поверхностного упрочнения образцов из инструментальной стали У8, 40ХН2МА, 5ХВ2С, 9ХС и Х12М позволили сформировать научно обоснованные рекомендации для реализации программ импортозамещения при производстве отечественного рабочего инструмента.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты исследования, позволившие разработать методику расчета технологических параметров ступенчатой тонколистовой гибки.

2. Результаты экспериментальных исследований по влиянию лазерного излучения на глубину закаленного слоя штампов, изготовленных из углеродистой и легированных инструментальных сталей У8, 40ХН2МА, 5ХВ2С, 9ХС и Х12М, способствующие реализации программы импортозамещения и снижению зависимости промышленности от зарубежных поставок оборудования и материалов.

Достоверность результатов работы.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена применением комплекса методов исследования, включающих аналитические исследования, моделирование, натурный эксперимент, а также корректностью применения математического аппарата и принятых допущений, использованных при разработке моделей, высокой степенью сходимости теоретических и экспериментальных данных, а также успешной апробацией в условиях промышленного производства.

Личный вклад автора.

Автор принимал непосредственное участие в формулировании цели и постановке задач исследований, проведении экспериментов, а также в обработке и анализе полученных результатов совместно с научным руководителем и соавторами публикаций. Основные положения и выводы сформулированы лично автором.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа по своей цели, задачам, содержанию и научной новизне соответствует паспорту специальности 2.5.7. «Технологии и машины обработки давлением» по п. 4. «Технологииковки, прессования, листовой и объемной штамповки, а также формования и комплексных процессов с обработкой давлением, например, непрерывного литья и прокатки заготовок».

Апробация результатов работы.

Ключевые положения диссертации представлены и обсуждены на следующих научных конференциях: Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования» Севастополь 12–14 февраля 2025 г.; Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования» Севастополь 10–12 мая 2023 г.; Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: 81-я международная научно-техническая конференция. – Магнитогорск. 17-21 апреля 2023 г.;

International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2021). SeVastopol, Russia, September 6-10, 2021.

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 17 научных источниках, включая 8 статей в рецензируемых изданиях ВАК РФ и 9 публикациях в других научных изданиях, а также представлены в виде докладов на 4 научно-технических конференциях.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы и приложений, изложена на 152 страницах машинописного текста, включающего 53 рисунка, 8 таблиц, 3 приложения, библиографический список из 135 наименования.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Классификация операций листовой штамповки

Одним из основных видов обработки металлов давлением (ОМД) является листовая штамповка, под которой понимают процесс получения обработкой давлением в штампах заготовок, полуфабрикатов и изделий из листового (иногда фасонного) проката преимущественно без изменения его толщины [1-3]. Листовая штамповка отличается от других способов ОМД тем, что один из размеров обрабатываемых заготовок (толщина) существенно меньше двух других – длины и ширины.

В зависимости от массы и толщины заготовки применяется холодная или горячая листовая штамповка [4-6]. В первом случае штампуют заготовки толщиной не более 10–15 мм. Заготовки большей толщины перед штамповкой обычно нагревают.

Для сравнительно тонких заготовок наибольшее распространение получила холодная листовая штамповка (ХЛШ), целесообразность использования которой обусловлена следующими причинами [7-8]:

- при горячей штамповке трудно поддерживать постоянную температуру по всей поверхности заготовки;
- при ХЛШ получают детали с хорошим качеством поверхности (при отсутствии окалины) и высокой точностью (при отсутствии тепловых деформаций);
- ХЛШ позволяет получать детали сложной пространственной конфигурации, что позволяет создавать облегченные конструкции заданной прочности и жесткости;
- применение ХЛШ позволяет существенно сократить или полностью исключить обработку резанием, что повышает коэффициент использования материала;
- ХЛШ отличается высокой производительностью.

ХЛШ является одним из наиболее прогрессивных технологических методов производства и имеет ряд преимуществ перед другими видами обработки металлов.

В техническом плане ХЛШ позволяет:

- получать детали сложных форм, изготовление которых другими методами невозможно или затруднительно;
- создавать прочные и жесткие, но легкие по массе детали;
- получать детали с достаточно высокой точностью размеров, преимущественно без последующей механической обработки.

В экономическом плане ХЛШ характеризуется:

- экономным использованием материала;
- высокой производительностью оборудования, с широким применением механизации и автоматизации технологических процессов;
- серийным и массовым производством с низкой себестоимостью изготавливаемых изделий.

В настоящее время ХЛШ широко применяется в мелкосерийном и единичном (опытном) производстве и характеризуется использованием универсальных и упрощенных штампов, а также новых технологических методов (штамповка взрывом, эластичным инструментом, импульсные методы). Кроме того, с развитием различных отраслей промышленности (робототехники, приборостроения и пр.) увеличивается доля изделий из листовых неметаллических материалов, изготавливаемых методами ХЛШ.

По характеру деформаций операции листовой штамповки, в соответствии с ГОСТ 18970–84, делят на две группы: разделительные и формоизменяющие [9].

К разделительным относятся операции, в результате которых происходит полное или частичное отделение одной части заготовки от другой с разрушением исходного материала.

К формоизменяющим относятся операции, в результате которых путем пластического деформирования происходит изменение формы заготовки.

Различают четыре основных вида деформации ХЛШ:

- 1) резка – отделение одной части материала от другой по замкнутому или незамкнутому контуру;
- 2) гибка – превращение плоской заготовки в изогнутую деталь;
- 3) вытяжка – превращение плоской заготовки в полую деталь любой формы или дальнейшее изменение ее размеров;
- 4) формовка – изменение формы детали или заготовки путем местных деформаций.

Каждый из основных видов деформаций холодной штамповки подразделяется на ряд отдельных конкретных операций, характеризующихся особенностью и назначением работы (рисунок 1.1). Штамповка деталей путем выполнения нескольких раздельных операций во многих случаях экономически невыгодна. Поэтому обычно применяют методы комбинированной штамповки, которые сочетают две или несколько отдельных операций.

Также необходимо отметить, что в традиционном виде операции листовой штамповки выполняют с помощью двух рабочих инструментов – пуансона и матрицы. Пуансоном называют инструмент, охватываемый заготовкой, а матрицей – инструмент, охватывающий заготовку [27].

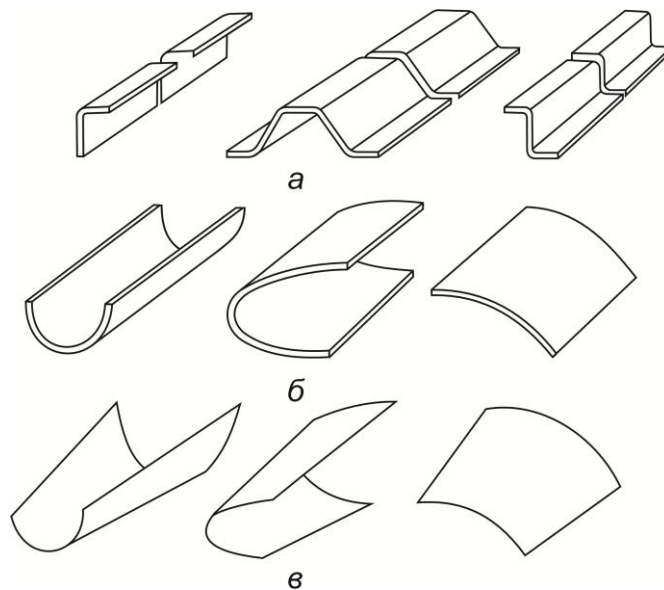
Важнейшим классом тонкостенных деталей являются детали одинарной кривизны, которые в зависимости от формы контура и поперечного сечения можно разделить на угловые, цилиндрические и конические (рисунок 1.2). Каждая из классификационных групп обладает присущими ей геометрическими особенностями формы, которые в основном и определяют характер технологических процессов изготовления деталей [10-12].

К первой группе относятся детали, контур которых образован сочетанием прямолинейных участков. Основной геометрический параметр, характеризующий форму, - угол загиба, который задается с определенной точностью и является сопрягаемым параметром при установке деталей в узлах и агрегатах. Криволинейный участок контура при вершине угла в большинстве случаев не является сопрягаемым параметром и обычно его величина назначается из

возможности формообразования при данных пластических свойствах деформируемого металла. Разновидность форм деталей рассматриваемой группы определяется различным сочетанием прямолинейных участков контура и различной величиной углов между ними.



Рисунок 1.1 – Основные операции холодной листовой штамповки



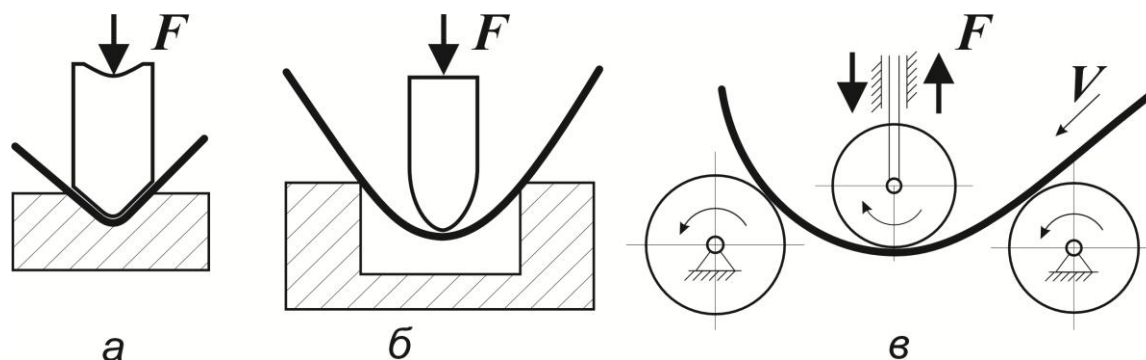
a – угловые, *б* – цилиндрические, *в* – конические.

Рисунок 1.2 – Типичные формы деталей одинарной кривизны, изготавливаемые методом пластического изгиба

Детали второй и третьей группы являются частью поверхности соответственно цилиндра и конуса. Нормальное сечение этих деталей представляет собой контур с тем или иным изменением кривизны, и в этом отношении различают детали с постоянной или переменной кривизной по контуру. В летательных аппаратах цилиндрические и конические детали входят в состав обшивки корпуса и образуют обтекаемые потоком воздуха поверхности, вследствие чего к точности и качеству их изготовления предъявляются высокие требования.

Применительно к классу тонкостенных деталей одинарной кривизны в производстве применяют ряд способов формообразования (рисунок 1.3), которые отличаются видами технологического инструмента и оснастки [13-15].

При гибке в инструментальных штампах на кривошипных и эксцентриковых прессах пуансон и матрица имеют формы и размеры, сопряженные с формой штампуемой детали (рисунок 1.3, *а*). Применение данного способа целесообразно при штамповке деталей относительно небольших габаритов в условиях крупно - серийного или среднесерийного производства.



а – гибка в инструментальных штампах, *б* – свободная гибка,
в – гибка-прокатка на многовалковых станках.

Рисунок 1.3 – Основные способы формообразования деталей одинарной кривизны, изготавливаемые методом пластического изгиба

Свободная гибка в универсальных штампах на специальных гибочных прессах характеризуется тем, что форма технологического инструмента не сопряжена с формой штампуемой детали (рисунок 1.3 *б*). Это позволяет на одном

комплекте инструмента изготавливать различные детали с разным углом изгиба и радиусом кривизны при вершине. Формообразование осуществляется в ручье матрицы путем свободного изгиба заготовки, вызываемого соответствующим перемещением пуансона. Применение данного способа целесообразно при штамповке длинномерных деталей различного профиля.

При гибке-прокатке на валковых копируемых гибочных станках формообразование детали осуществляется путем поперечного изгиба с одновременным перемещением заготовки между деформирующими валками (рисунок 1.3 в). В современных станках параметры настройки могут автоматически изменяться в процессе прокатки заготовки, в результате чего получаются детали с переменной кривизной по контуру. Применение данного способа целесообразно при изготовлении цилиндрических и конических деталей средних и крупных габаритов из листового металла.

В авиационной промышленности, кроме основных способов ХЛШ, используемых в общем машиностроении, нашли широкое применение специфические методы формообразования крупногабаритных деталей из листового и профильного металла: гибка с растяжением на специальных станках, гибка-прокатки на валковых и роликовых гибочных станках и др.

При разработке технологических процессов ХЛШ необходимо решить следующие основные задачи.

1. Расчет энергосиловых факторов процесса формообразования. Знание таких факторов необходимо как при проектировании оборудования для осуществления новых способов формообразования, так и при выборе оборудования для формообразования известными способами деталей заданной формы и размеров.

2. Расчет пружинения. Для получения деталей заданной кривизны необходимо знать величину пружинения и учесть её в процессе формообразования.

Определения рациональной формы технологической оснастки и параметров настройки. Постановка этих задач обусловлена тем, что формы деталей зависят от

форм сопряженной с ними оснастки и параметров настройки оборудования. Поэтому от их правильного выбора зависит точность процесса формообразования.

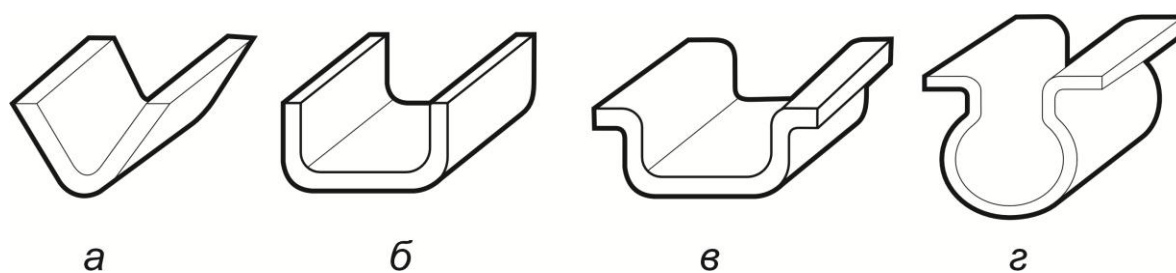
В данной работе приведено обобщение работ автора по исследованию процессов формообразования деталей одинарной кривизны методом ступенчатой гибки, основанной на способе свободной гибки.

Цель работы и задачи исследования сформулированы во введении.

1.2 Анализ современных технологических процессов гибки тонких металлических листов

Гибка листового металла — одна из распространенных операций холодного и горячего деформирования. Она отличается малой энергоемкостью, и при правильной разработке технологического процесса позволяет успешно производить из плоских заготовок пространственные изделия различной формы и размеров [16-18].

В соответствии с поставленными задачами в технологии гибки листового металла применяют следующие варианты гибки: одно угловая (*V*-образная гибка), двух угловая (*U*-образная гибка), много угловая гибка, радиусная гибка (закатка) и др. (рисунок 1.4)



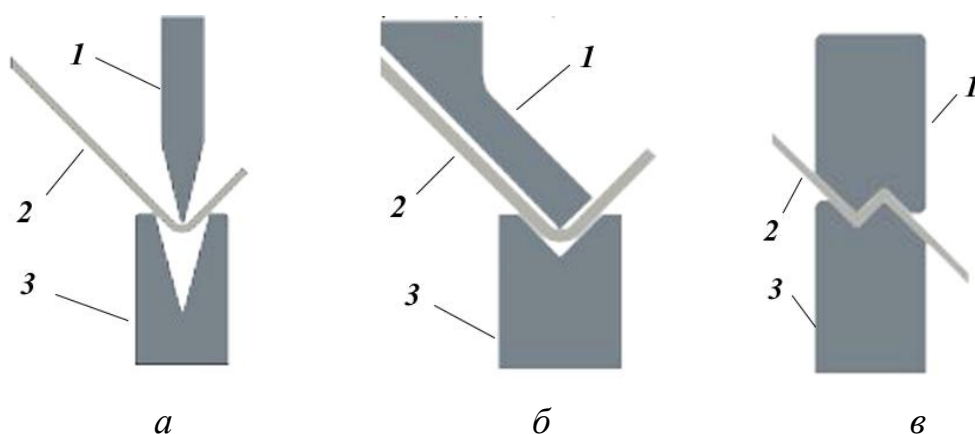
а — одно угловая, *б* - двух угловая, *в* - много угловая гибка, *г* — радиусная.

Рисунок 1.4 – Основные варианты гибки листового материала

Гибку тонких металлических листов обычно осуществляют в холодном состоянии, так как необходимые для формоизменения усилия сравнительно небольшие. Гибку в горячем состоянии используют для изготовления деталей из

недостаточно пластичных металлов, такие как дюралюминий, высокоуглеродистые стали, титан и его сплавы, а также для изгиба заготовок из толстолистого металла толщиной более 12...16 мм.

В основном различают 3 вида гибки: свободная или воздушная гибка, гибка на основе или нижняя гибка; чеканка или калибровка (рисунок 1.5).



а – свободная (воздушная), *б* – на основе, *в* – чеканка;

1 – пуансон, *2* – деформируемый лист, *3* – матрица.

Рисунок 1.5 – Основные виды гибки листового материала

Свободная гибка. При свободной гибке между деформируемым металлическим листом и стенками V-образной матрицы существует воздушный зазор, и поэтому лист остается «в воздухе» и не соприкасается со стенками матрицы. Пуансон воздействует на металл сверху в одной точке, а матрица только двумя точками вверху V-образного паза. Геометрия изгиба формируется только за счет глубины погружения пуансона в матрицу. Ширина ручья на матрице чаще всего выбирается из расчета 10-15 толщин металла, а инструмент имеет угол намного более острый, чем деталь после гибки.

Гибка на основе. В отличие от классической воздушной гибки при гибке на основе заготовка в самом конечном положении контактирует со стенками V-образного паза и нижней частью пуансона. Требуемое усилие выше, чем при «свободной гибке», до трех раз. Раскрытие матрицы выбирается из диапазона 6-10 толщин металла.

Чеканка. В этом методе деформируемый листовой металл зажат полностью между пуансоном и стенками матрицей, при этом лист металла не только сгибается, но и сжимается. Угол гибки определяется усилием гибки и геометрией технологического инструмента. Давление продолжается даже при достижении нижней точки, за счет этого практически отсутствует упругая деформация, а лист металла пластически деформируется под давлением инструмента.

Листогибочные прессы широко используются в процессах промышленного производства для точной и эффективной гибки и формования металлических листов. Основными особенностями листогибочных машин являются пониженные скорости деформирования, увеличенные размеры штампового пространства и сравнительно небольшие показатели энергопотребления. В зарубежной литературе для обозначения листогибочных машин часто используется термин «Press Brake», который можно перевести как «пресс-тормоз». В основном существуют две категории листогибочных прессов: механические и гидравлические [22-25].

В механических листогибочных прессах для создания усилия используется электромеханическая приводная система, при этом усилие прессования передается на оснастку через кривошипно-шатунный механизм или эксцентриковую передачу. Механические прессы работают на высоких скоростях и обеспечивают достаточно хорошую точность, благодаря чему они получили широкое распространение для выполнения простых, повторяющихся задач гибки материалов тонкой и средней толщины. Их основной недостаток заключается в том, что они требуют более частого технического обслуживания и менее энергоэффективны по сравнению с гидравлическими листогибочными прессами.

В гидравлических листогибочных прессах для создания изгибающего усилия используется энергия жидкости. Они оснащены гидроцилиндрами, и усилие, прикладываемое к оснастке, регулируется изменением давления гидравлической жидкости. Гидравлические листогибочные прессы обладают рядом преимуществ по сравнению со своими механическими аналогами.

- Большая универсальность: гидравлические листогибочные прессы могут эффективно работать с более широким диапазоном типов материалов и толщин.
- Более высокая точность: гидравлическая система позволяет лучше контролировать прикладываемое усилие, что приводит к более точным операциям гибки.
- Более низкие затраты на техническое обслуживание: гидравлические компоненты, как правило, требуют меньшего технического обслуживания по сравнению с механическими системами.

Хотя, как механические, так и гидравлические листогибочные прессы имеют свои уникальные преимущества и области применения, гидравлические машины становятся все более популярными благодаря своей универсальности, точности и простоте обслуживания. Независимо от типа, выбор наиболее подходящего листогибочного прессы для любого производственного проекта будет зависеть от таких факторов, как требования к материалам, объем производства и желаемые эксплуатационные характеристики [17].

1.3 Обоснование выбора ступенчатой гибки тонколистовой стали

Дуговые заготовки являются распространенным типом изделий из листового металла для изготовления корпусов различных приборов и изделий. Их структура вариативна, а сложность обработки иногда бывает больше, чем у обычных заготовок. На практике для получения заготовок с дугообразными элементами обычно используются два метода формовки [26-28].

1. Одноступенчатая формовка с помощью матрицы и пуансона, профили которых соответствуют заданной конфигурации заготовки: Этот метод обычно используется для заготовок сложной формы, и его преимуществами являются хорошая точность формовки, гладкая и ровная поверхности заготовки, отсутствия вмятин. Однако стоимость прессового инструмента достаточно высокая, а

универсальность его использования оставляет желать лучшего. Поэтому его применение эффективно для крупносерийного производства.

2. Многошаговая формовка (ступенчатая гибка): Этот метод основан на преобразовании отдельной части дуги в отрезок линии, который может быть сформирован с помощью существующего технологического инструмента и оборудования. Диапазон применения данного метода достаточно широк, так как не требуется изготовление матрицы и пуансона под конкретный заказ и поэтому стоимость изготовления заготовок низкая, а качество формовки хорошее. Обычно данный метод используют в тех случаях, когда одноступенчатый процесс не может быть реализован или к поверхности заготовки не предъявляют высоких требований к её качеству. Поэтому он находит широкое применение для мелкосерийного и индивидуального производства.

Рассмотрим технологии получения радиуса изгиба деталей из листового металла методом ступенчатой гибки конкретной изогнутой заготовки.

Процесс гибки широко используется в обрабатывающей промышленности с целью придания листовому металлу заданной формы, при этом внутренняя сторона листа сжимается, а внешняя растягивается. При ступенчатой гибке применяют процесс воздушной гибки, известному также как свободный изгиб, при котором за счет изменения хода пуансона достигаются различные углы изгиба с использованием одного и того же инструмента. В этом процессе заготовка из листового металла соприкасается с двумя внешними краями матрицы и рабочими поверхностями пуансона, при этом она не поддерживается снизу, и форма изгиба определяется радиусом пуансона и отверстием матрицы. Воздушная гибка более универсальная, чем ее аналог - гибка V-образным штампом, при которой различные углы изгиба достигаются путем замены пуансона и матрицы в процессе гибки V-образным штампом. Поскольку перемещение пуансона определяет углы изгиба при воздушной гибке, количество смен инструмента, необходимых для достижения различных углов, сокращается. Поэтому использование воздушной гибки в автомобилестроении, самолетостроении и других отраслях промышленности очень распространено. Воздушная гибка подходит для разработки прототипов,

изготовления деталей и мелкосерийного производства благодаря гибкости, меньшему количеству изменений и низкой стоимости оснастки.

Основной принцип многоступенчатого процесса формовки заключается в замене дуги изгиба многоугольником, каждая сторона которого представляет собой прямолинейный участок листового металла осуществляется с помощью пуансона малого радиуса.

Очевидно, что точность формирования дугового сегмента с помощью полилиний зависит от их количества - чем больше число ступеней изгиба, тем более плавным получается формируемый профиль, но при этом процесс гибки становится более трудоемким и технически сложным. Поэтому от правильного выбора количество ступеней зависят технико-экономические показатели процесса. При таком способе гибки трудно избежать призматической структуры на поверхности заготовки; следует также отметить, что следы от ступенчатых изгибов будут более заметны на внутренней стороне изгибаемого листового материала по сравнению с внешней стороной.

В работе [29] рассмотрена процедура замены дуги окружности на сегменты полилиниями и угол изгиба сегментов на примере стальной детали, показанной на рисунке 1.6, для которой внутренний радиус дуги составляет $R = 350$ мм, угол изгиба — $\alpha_{\text{изг}} = 120^\circ$, а толщина пластины — $s = 5$ мм.

Поскольку условия использования заготовки удовлетворяет особенностям метода многошаговой формовки, для её обработки использован метод ступенчатой гибки. На основе прошлого опыта формовки и имеющегося в наличии технологического инструмента, использован пуансон с радиусом наконечника $r = 120$ мм.

Для осуществления многоступенчатой формовки криволинейный сегмент (дуга радиусом $R = 350$ мм) разделен на 6 сегментов (ступеней) - полилиний. Опыт изготовления подобных деталей показал, что для обеспечения более плавного перехода дуги в прямолинейный участок заготовки (т.е. на концевых участках криволинейного сегмента) угол ступени целесообразно принимать равным половине угла центральных сегментов. Из рисунка 1.7 видно, что заготовка,

показанная на предыдущем рисунке, формируется путем изгиба 7 раз, при этом концевые (первый и второй) углы изгиба, соответствующие одной ступени $\alpha_{\text{ступ}}$, равны 6° , а остальные (центральные) углы равны 12° . Углы изгиба, соответствующие каждому сегменту (ступеней) равны $\alpha_{\text{сгуп}} \approx 170^\circ$.

Развернутый вид деформируемой заготовки с указанием линий изгиба показан на рисунке 1.8, а её аксонометрическое изображение показано на рисунке 1.9.

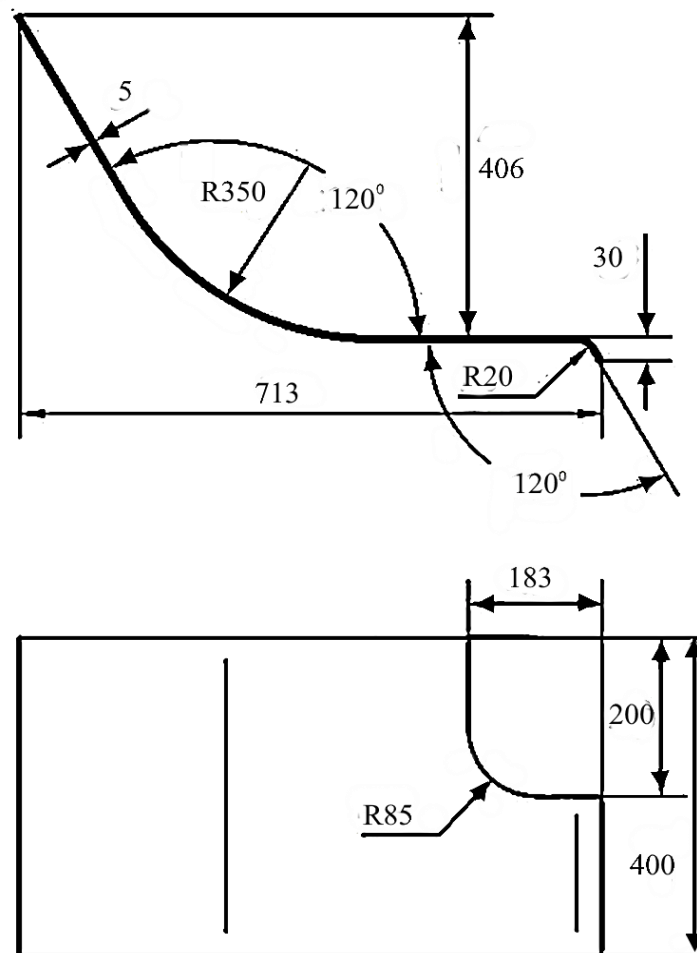


Рисунок 1.6 – Пример детали для сегментации дугового изгиба

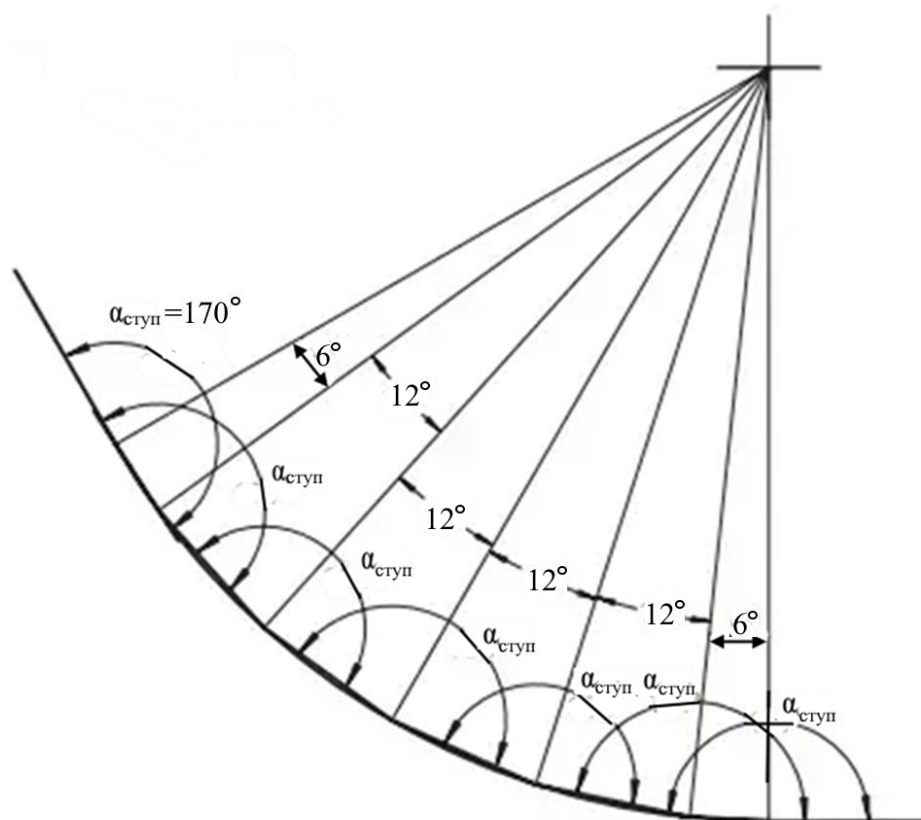


Рисунок 1.7 – Сегментация дугового изгиба полилиннй (7 изгибов)

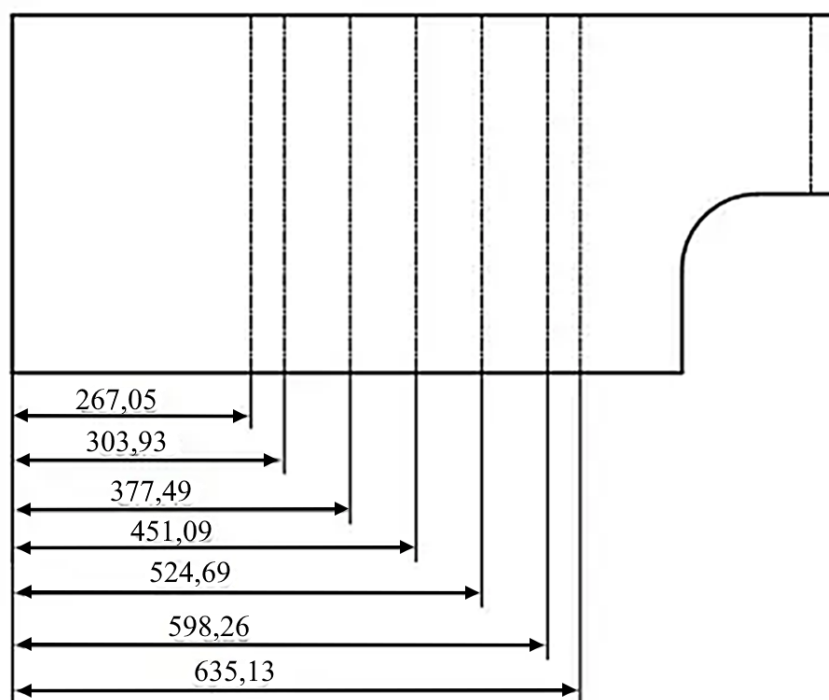


Рисунок 1.8 – Развернутый вид деформируемой заготовки с указанием линий изгиба

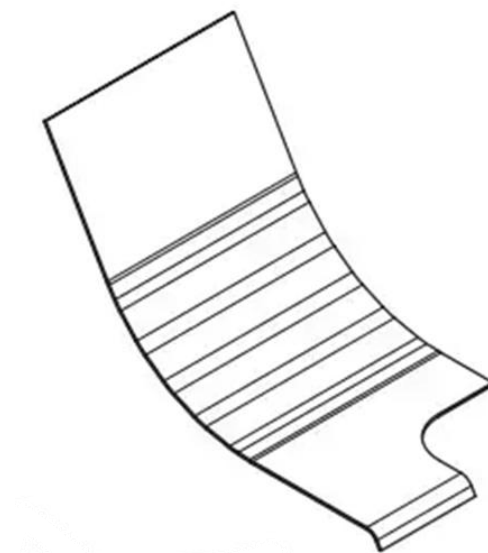


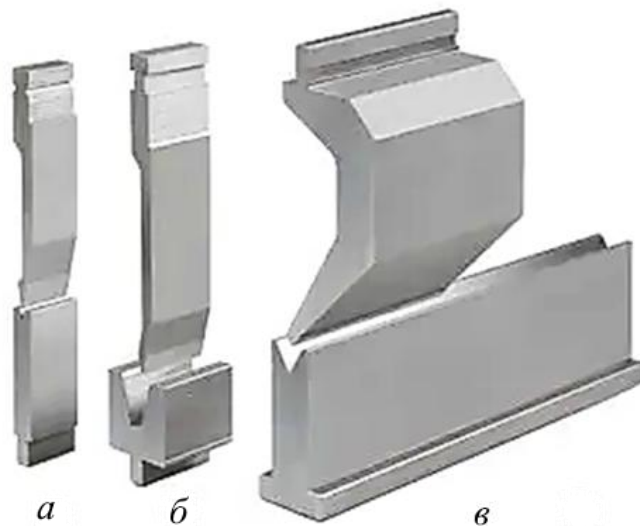
Рисунок 1.9 – Аксонометрическое изображение деформируемой заготовки

1.4 Технологический инструмент ступенчатой гибки

1.4.1 Общие сведения

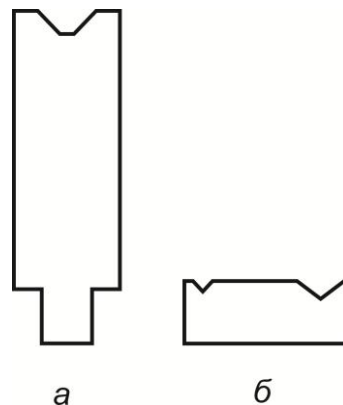
Технологический инструмент листогибочного прессы — это штампы, используемые в листогибочном прессе для формовки листового материала и состоящие из различных компонентов, состав которых может варьироваться [30-32]. Основная функция штампа листогибочного прессы заключается в изменении физического состояния формируемого материала, тем самым формируя деталь. Штампы листогибочного прессы обычно можно разделить на несколько частей, включая верхний штамп (пуансон), нижний штамп (матрица), направляющие и башмаки, которые поддерживают верхний пуансон и нижнюю матрицу.

В зависимости от требуемых параметров гибки предложено большое количество различных типов технологического инструмента (более 12), среди которых для ступенчатой гибки наибольшее применение получили прямые пуансоны, пуансоны с гусиной шейкой и острые пуансоны (рисунок 1.10), а также одиночная и двойная V-образные матрицы (рисунок 1.11).



a – острым изгиб пуансоном, *б* – прямой изгиб пуансоном, *в* – с гусиной шейкой.

Рисунок 1.10 – Технологический инструмент гибочного пресса для V- образного изгиба пуансоном



a – одиночный изгиб, *б* – двойной изгиб.

Рисунок 1.11 – Матрицы для V-образного изгиба

В зарубежной практике, как правило, стандартная длина пуансона и матрицы листогибочного пресса составляет 835 мм, и ее можно разделить на различные размеры для гибки заготовок разной длины (рисунок 1.12). Размеры обычно включают 10 мм, 15 мм, 20 мм, 40 мм, 50 мм, 100 мм, 200 мм и 300 мм, в общей сложности до 835 мм [33-35].

Секционированный инструмент позволяет операторам использовать комбинации более коротких сегментов инструмента для достижения требуемой длины или настройки. Преимущества заключаются в следующем.

- Гибкость: обеспечивается большая универсальность за счет подбора сегмента в соответствии с конкретными требованиями программ.
- Простота в эксплуатации: более короткими инструментами проще управлять, устанавливать и восстанавливать.
- Снижение износа: если отдельные части оснастки изношены или повреждены, замените их, а не меняйте все целиком.
- Экономическая эффективность: секционированный инструмент можно быстро переустановить, что сокращает время настройки и повышает производительность; кроме того, оператор может инвестировать в секционированную группу, вместо нескольких длинных инструментов, используемых для различных операций, можно использовать набор сегментов, тем самым снижая затраты в долгосрочной перспективе.

В процессе работы на листогибочном прессе с ЧПУ часто возникает необходимость перенастройки станка и замена инструмента. При переходе на инструмент другой высоты нужно заново вводить новые данные и демонтировать предыдущий инструмент. Иногда для изготовления одной детали приходится использовать несколько видов пуансонов с разной геометрией, что требует высокой квалификации оператора и может занимать довольно много времени, что приводит к простоем оборудования и снижению производительности процесса гибки.

В качестве решения этой проблемы предлагается использовать серию пуансонов одной фиксированной высоты «*Barus Fixed Height*» (BFH) $H_{\text{п}}=100$ мм [36]. Практика показывает, что это рациональная высота при креплении пуансонов к траверсе через стандартные держатели (адаптеры), которая позволяет изготавливать большинство стандартных деталей без значительного уменьшения просвета прессы, чтобы удобно было снимать готовые детали.

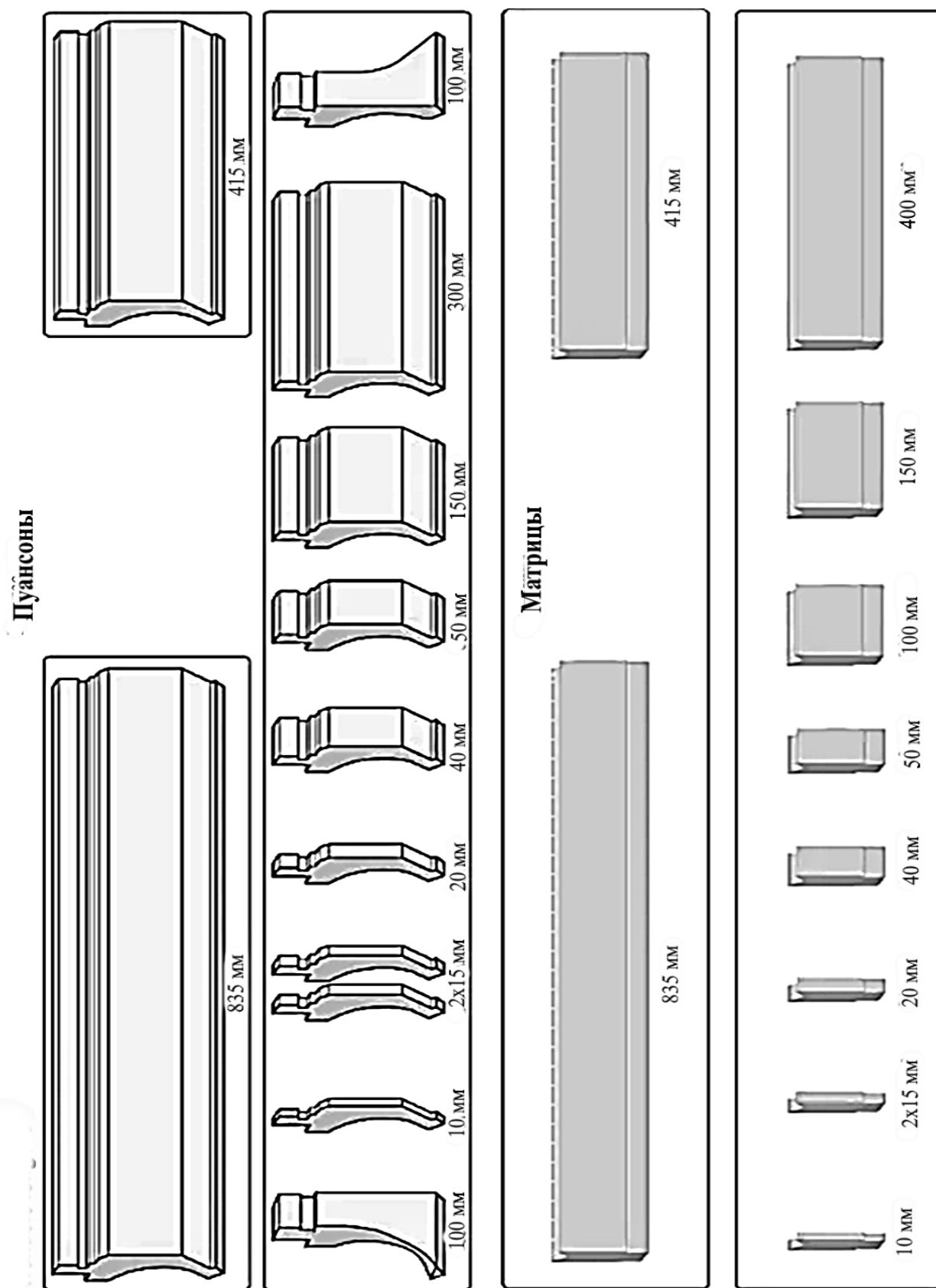


Рисунок 1.12 – Доступная длина пуансонов (верхние части) и матриц (нижние части) для одиночного V-образного изгиба

Большинство пуансонов имеют радиус наконечника 0,6 мм, что позволяет эффективно использовать их на толщинах материала от 0,5 мм до 3 мм включительно и получать стандартные (табличные) внутренние радиусы гибов. По запросу можно дополнить эту серию пуансонами для более толстых металлов, например, с радиусами до 6 мм.

Пуансоны имеют максимальный угол гибки 85° , что позволяет получать угол 90° даже на металле с большими упругими деформациями, такими как нержавеющая сталь. Все пуансоны изготовлены из материала 42CrMo4, индукционно закалены, шлифованы и имеют антикоррозионное покрытие.

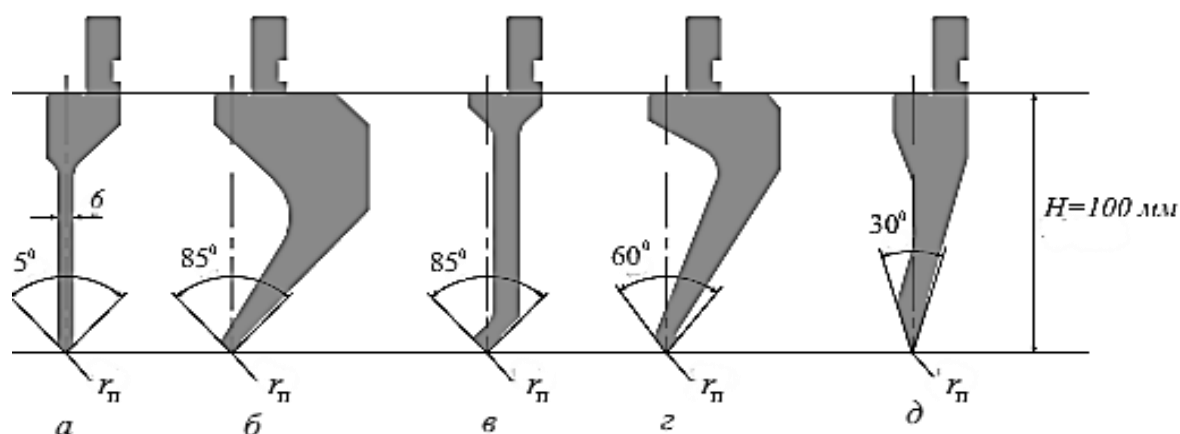
Преимущества серии *BFH*:

- одновременное использование инструментов разной геометрии;
- стандартные параметры инструмента: высота, радиусы, градусы;
- минимальное время на переналадку, увеличение производительности;
- снижение количества дефектов и деформаций инструмента.
- упрощение программирования инструмента.

Простые изделия, имеющие один изгиб (например, уголки), можно гнуть практически любым пуансоном. Но часто необходимо изготавливать более сложные изделия. При выборе формы пуансонов был проведен анализ геометрии гибов наиболее часто практически встречающихся при гибке листового металла (рисунок 1.13).

Прямой пуансон имеет хорошую рабочую область с лицевой и обратной стороны за счет тонкого тела пуансона толщиной 6 мм. Позволяет делать почти замкнутые контуры детали.

Изогнутый выпуклый пуансон «гусиная шея» имеет большую рабочую область сзади и позволяет делать глубокие П-образные гибы с высотой бортов значительно больше основания. Наконечник пуансона толщиной 6 мм позволяет делать минимальные основания у швеллера.



а – прямой пуансон, *б* – изогнутый выпуклый пуансон типа «гусиная шея»,
в – универсальный пуансон с небольшим подгибом, *г* – изогнутый пуансон с рабочей областью спереди пуансона, *д* – острый прямой пуансон.

Рисунок 1.13 – Серия пуансонов одной фиксированной высоты «*Barus Fixed Height*» (*BFH*) высотой $H = 100$ мм и радиусом наконечника $r_n = 0,6$ мм

Универсальный пуансон с небольшим подгибом подходит для многих стандартных гибов. Особенно часто используют для производства металлических дверей или несложных панелей.

Изогнутый пуансон в отличие от обычных пуансонов типа «гусиная шея» имеет рабочую область спереди пуансона. Кроме стандартных гибов хорошо справляется с *C*-образными гйбами.

Острый прямой пуансон позволяет делать острые углы гибов, имеет большую погонную нагрузку (до 100 т/м) и может использоваться со стандартными матрицами и с матрицами для плющения.

Для ступенчатой гибки как правило используются матрицы с одним ручьем высотой 80 мм или 120 мм, при этом ширину ручья V принимают равной 6-8 толщин металла. Матрицы высотой 80 мм менее универсальны, но более дешевые и поэтому больше распространены. Матрицы высотой 120 мм более дорогие, более универсальны, особенно актуальны для производителей дверей и сложной номенклатуры. Также при выборе высоты матриц нужно обратить внимание на

раскрытие и рабочий ход пресса, чтобы верхний инструмент доходил до нижнего и деталь после гибки удобно извлекать.

1.4.2 Материалы технологического инструмента

Наиболее распространенные материалы, используемые для штампов листогибочного пресса, можно разделить на следующие категории.

- Углеродистая инструментальная сталь (*Carbon tool steel*).

У8А и У10А часто используется в производстве штампов листогибочного пресса благодаря хорошей обрабатываемости и экономичности. Однако эти материалы имеют плохую прокаливаемость и могут подвергаться значительной деформации при термической обработке. Кроме того, они обладают низкой способностью выдерживать нагрузки.

- Низколегированная инструментальная сталь (*Low alloy tool steel*).

За счет включения соответствующего количества легирующих элементов в углеродистую инструментальную сталь получают низколегированную инструментальную сталь, которая снижает склонность к деформации и растрескиванию при закалке и улучшает прокаливаемость и износостойкость стали. Часто используемыми низколегированными сталями в производстве штампов листогибочных прессов являются ХВГ, 09Г2 и др.

- Инструментальная сталь с высоким содержанием углерода и хрома (*High carbon and high chromium tool steel*).

Инструментальная сталь с высоким содержанием углерода и хрома обладает хорошей прокаливаемостью, ударной вязкостью и устойчивостью к износу. Она подвергается минимальной деформации при термической обработке, что делает её высоко износостойкой сталью с несущей способностью, уступающей только быстрорежущей, стали. Однако из-за значительной сегрегации карбидов требуется дополнительная термомеханическая обработка для уменьшения гетерогенной природы карбидов и улучшения их характеристик. Наиболее распространенными

высокоуглеродистыми и высокохромистыми инструментальными сталями включают X12, X12M и др.

– Высокоуглеродистая инструментальная сталь со средним содержанием хрома (*High carbon medium chromium tool steel*).

Инструментальная сталь с высоким содержанием углерода и средним содержанием хрома, используемая для штампов листогибочного прессы, включает, среди прочего, Cr4W2MoV, Cr6W, Cr5MoV. Эти материалы имеют низкое содержание хрома, меньшее количество эвтектических карбидов, равномерное распределение карбидов, минимальную деформацию при термообработке, хорошую прокаливаемость и стабильные размеры. По сравнению с высокоуглеродистой и высокохромистой сталью, которая может демонстрировать значительную карбидную сегрегацию, эти материалы обладают улучшенными свойствами.

– Быстрорежущая сталь (*High-speed steel*).

Быстрорежущая сталь часто используется в производстве штампов листогибочного прессы из-за ее высокой твердости, износостойкости и прочности на сжатие. Она также обладает высокой несущей способностью. Обычно используются W18Cr4V, W6Mo5 и Cr4V2 с восстановленным содержанием вольфрама, а также быстрорежущие стали 6W6Mo5 и Cr4V, разработанные для повышения ударной вязкости. Для улучшения распределения карбидов быстрорежущая сталь также нуждается в ковке. В отечественных гибочных прессах для изготовления штампов используются стали P9 и P18,

– Базовая сталь (*Basic steel*).

Базовая сталь производится путем добавления небольшого количества других элементов к быстрорежущей стали и регулировки содержания углерода для улучшения ее свойств. Это приводит к улучшенным свойствам по сравнению с быстрорежущей сталью, таким как повышенная износостойкость и твердость, а также лучшая усталостная прочность и ударная вязкость. Это сталь штампа листогибочного прессы с высокой прочностью и ударной вязкостью, и она более экономична, чем быстрорежущая сталь. К основным стальным материалам,

используемым в штампах листогибочных прессов, относятся, среди прочих, 6Cr4W3Mo2VNb, 7Cr7Mo2V2Si, 5Cr4Mo3SiMnVAL и другие.

– Твердый сплав (*Cemented carbide*).

Твердость и стойкость к износу твердого сплава в штампах листогибочного пресса являются самыми высокими, но его прочность и ударная вязкость при изгибе низкие. Вольфрам-кобальт используется в качестве твердого сплава в штампах листогибочных прессов. Для штампов листогибочного пресса, требующих низкой ударной прочности и высокой износостойкости, можно выбрать твердый сплав с низким содержанием кобальта. Для ударопрочных штампов можно использовать твердый сплав с высоким содержанием кобальта. Твердый сплав на стальной связке изготавливается методом порошковой металлургии с использованием железного порошка и небольшого количества порошка легирующих элементов (таких как хром, молибден, вольфрам или ванадий) в качестве связующего вещества и карбида титана или карбида вольфрама в качестве твердой фазы. Матрица твердого сплава со стальной связкой представляет собой сталь, которая устраняет плохую ударную вязкость и сложную обработку твердого сплава. Этот материал можно резать, сваривать, ковать и подвергать термообработке. Цементированный карбид, скрепленный сталью, содержит много карбидов и обладает твердостью и износостойкостью, которые ниже, чем у цементованного карбида, но все же выше, чем у других марок стали. После закалки и отпуска твердость может достигать 68-73 HRC.

– Новые материалы (*New materials*).

Материал, используемый для листогибочного пресса, представляет собой тип штамповой стали для холодной обработки, и его основными требованиями к характеристикам являются прочность, ударная вязкость и устойчивость к износу. В настоящее время тенденция развития штампов листогибочного пресса имеет два основных направления.

1. Повышение ударной вязкости штампа листогибочного пресса включает в себя снижение содержания углерода и легирующих элементов, а также

повышение равномерности распределения карбида в стали. Примерами этого направления являются 8CrMo2V2Si и Cr8Mo2SiV.

2. Повышение стойкости к износу штампа листогибочного прессы для обеспечения высокоскоростного, автоматизированного и крупносерийного производства из порошковой быстрорежущей стали. Примером такого направления является 320CrVMo13.

В настоящее время наиболее широко используемым материалом для производства листогибочных инструментов являются углеродистые и легированные стали. В зарубежной практике часто применяется сталь 42CrMo — это высокопрочная легированная сталь, которая прошла закалку и отпуск для получения высокой прочности и ударной вязкости. Она может работать при высоких и низких температурах и обладает высокой прочностью, ударной вязкостью и устойчивостью к износу. Из отечественных материалов наибольшее распространение для изготовления пуансонов и матриц листогибочных прессов получили инструментальные углеродистые (типа У8А) и низколегированные (типа Х12М) стали.

1.4.3 Термообработка инструмента листогибочных прессов

Для улучшения механических характеристик технологический инструмент листогибочного прессы подвергается термической обработке, основным видом которой являются различные виды закалки.

Закалка металла — вид термической обработки, заключающийся в их нагреве выше критической точки (температуры изменения типа кристаллической решетки, то есть полиморфного превращения) с последующим быстрым охлаждением. Материал, подвергшийся закалке, приобретает большую твёрдость, но становится хрупким, менее пластичным и менее вязким. Для снижения хрупкости и увеличения пластичности и вязкости после закалки с полиморфным превращением применяют отпуск. При отпуске имеет место некоторое снижение твёрдости и прочности материала [77].

Типы стали, которые могут подвергаться такой обработке, содержат 0,4 – 0,6 % углерода и поэтому называются закаленной и отпущенной сталью.

Для поверхностного упрочнения технологический инструмент листогибного пресса часто используется процесс индукционной закалки, при котором сталь нагревается с помощью переменного магнитного поля до заданной температуры с последующей немедленной закалкой. Обработка не влияет на сердцевину инструмента в то время как твердость поверхности может находиться в диапазоне 37/58 *HRC*. Для этого процесса наиболее подходят углеродистые и легированные стали с эквивалентным содержанием углерода в диапазоне 0,40...0,45 %.

Повышение эксплуатационных свойств технологического инструмента ступенчатой гибки методом лазерного упрочнения рассмотрено в главе 3.

1.4.4 Конструктивные элементы гибочного инструмента

В общем случае на величину усилия гибки и на качество изгибаемых деталей оказывают влияние радиусы закругления рабочих кромок матрицы, радиус наконечника пуансона и величина зазора между матрицей и пуансоном. Для воздушной гибки, которая используется в процессе ступенчатой гибки, последний фактор можно не учитывать.

Почти все применяемые инструменты для V-образной гибки оставляют на деформируемой детали некоторые следы – вмятины, царапины и другие нарушения поверхности. В большинстве случаев эти нарушения незначительны и приемлемы, при этом увеличение радиуса наконечника пуансона может существенно их уменьшить. Для применений, где недопустима даже минимальные повреждения поверхности, например, при гибке предварительно окрашенных или отполированных материалов, можно использовать деформируемые мягкие (резиновые или нейлоновые) вставки для устранения царапин. Гибка листового материала без царапин особенно важна при изготовлении критически важных деталей самолетов и аппаратов аэрокосмической промышленности, поскольку при

инспекции трудно визуально определить разницу между царапинами и трещинами. Для исключения повреждения поверхности деформируемого листа необходимо, чтобы максимальные контактные напряжения от воздействия пуансона не превышали допускаемого напряжения смятия. В некоторых источниках даются общие соображения о выборе радиуса наконечника пуансона, но отсутствуют конкретные зависимости по его выбору.

Радиусы закругления рабочих кромок матрицы $r_{\text{мат}}$ можно определить, исходя из деформации наиболее растянутых наружных волокон ε_r , по следующей формуле [37].

$$r_{\text{мат}} = \frac{1-\varepsilon_r}{2 \cdot \varepsilon_r} \cdot \delta, \quad (1.1)$$

где $\varepsilon_r = \delta/(2 \dots 3)$ – деформация наружных волокон, которую можно принять равной; δ – относительное удлинение при разрыве.

Радиус закругления матрицы зависит также от длины загибаемой полки детали $L_{\text{пол}}$ и других факторов (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Радиусы закругления рабочих кромок матрицы [37]

Длина загибаемой полки, $L_{\text{пол}}$, мм	Толщина материала, мм			
	До 0,5	0,5...2,0	2,0...4,0	4,0...7,0
10	3	3	4	-
20	3	4	5	8
35	4	5	6	8
50	5	6	8	10
75	6	8	10	12
100	-	10	12	15
150	-	12	15	20
200	-	15	20	25

Чем меньше радиусы закругления матрицы, тем больше усилие гибки, что обусловлено уменьшением плеча гибки и увеличением сопротивления скольжению изгибаемого металла по мастернице. При малых радиусах закругления матрицы могут появляться дефекты, ухудшающие качество поверхности деталей (вмятины,

задиры и др.). Поэтому в производственных условиях рекомендуется работать на матрицах с нормальными радиусами закругления рабочих кромок матрицы.

Радиусы закругления пуансона $r_{\text{п}}$ обычно принимают по внутреннему радиусу изделия, при конструктивной необходимости его можно принимать равным радиусу закругления матрицы $r_{\text{мат}}$.

Методика определения радиуса наконечника пуансона при воздушной гибке листового металла изложена в разделе 2.4.

Выводы по главе 1

На основании анализа опубликованных работ можно сделать следующие выводы.

1. Для тонколистовых заготовок наибольшее распространение получила холодная листовая штамповка (ХЛШ), целесообразность использования которой обусловлена как техническими, так и экономическими причинами.

2. Важнейшем классом тонкостенных деталей являются детали одинарной кривизны, которые в зависимости от формы контура и поперечного сечения можно разделить на угловые, цилиндрические и конические. Каждая из классификационных групп обладает присущими ей геометрическими особенностями формы, которые в основном и определяют характер технологических процессов изготовления деталей. Основные способы формообразования деталей одинарной кривизны, изготавливаемые методом пластического изгиба: гибка в инструментальных штампах, свободная гибка, гибка-прокатка на валковых станках. В диссертации приведено обобщение работ автора по исследованию процессов формообразования деталей одинарной кривизны методом ступенчатой гибки, основанной на способе свободной гибки.

3. Изучены конструкции современных листогибочных машин, имеющие сравнительно небольшие показатели энергопотребления при наличии большого рабочего пространства. В зарубежной литературе для обозначения листогибочных машин часто используется термин «Press Brake», который можно перевести как «пресс-тормоз». В основном существуют две категории листогибочных пресов:

механические и гидравлические. Как механические, так и гидравлические листогибочные прессы имеют свои уникальные преимущества и области применения, гидравлические машины становятся все более популярными благодаря своей универсальности, точности и простоте обслуживания. Независимо от типа, выбор наиболее подходящего листогибочного прессы для любого производственного проекта будет зависеть от таких факторов, как требования к материалам, объем производства и желаемые эксплуатационные характеристики.

4. Дуговые заготовки являются распространенным типом изделий из листового металла для изготовления корпусов различных приборов и изделий. Их структура вариативна, а сложность обработки иногда бывает больше, чем у обычных заготовок. На практике для производства заготовок с дугообразными элементами обычно используются два метода формовки. Одноступенчатая формовка с помощью матрицы и пуансона, профили которых соответствуют заданной конфигурации заготовки: этот метод обычно используется для заготовок сложной формы, и его преимуществами являются хорошая точность формовки, гладкая и ровная поверхности заготовки, отсутствия вмятин. Однако стоимость прессового инструмента достаточно высокая, а универсальность его использования оставляет желать лучшего. Поэтому его применение эффективно для крупносерийного производства. Многошаговая формовка (ступенчатая гибка): этот метод основан на преобразовании отдельной части дуги в отрезок линии, который может быть сформирован с помощью существующего технологического инструмента и оборудования. Диапазон применения данного метода достаточно широк, так как не требуется изготовление матрицы и пуансона под конкретный заказ и поэтому стоимость изготовления заготовок низкая, а качество формовки хорошее. Обычно данный метод используют в тех случаях, когда одноступенчатый процесс не может быть реализован или к поверхности заготовки не предъявляют высоких требований к её качеству. Поэтому он находит широкое применение для мелкосерийного и индивидуального производства.

5. Технологический инструмент листогибочного прессы — это штампы, используемые в листогибочном прессе для формовки листового материала и

состоящие из различных компонентов, состав которых может варьироваться. Основная функция штампа листогибочного прессы заключается в изменении физического состояния формируемого материала, тем самым формируя деталь. Штампы листогибочного прессы обычно можно разделить на несколько частей, включая верхний штамп (пуансон), нижний штамп (матрица), направляющие и башмаки, которые поддерживают верхний пуансон и нижнюю матрицу. В зависимости от требуемых параметров гибки предложено большое количество различных типов технологического инструмента (более 12), среди которых для ступенчатой гибки наибольшее применение получили прямые пуансоны, пуансоны с гусиной шейкой и острые пуансоны, а также одиночная и двойная V-образные матрицы.

6. В настоящее время наиболее широко используемым материалом для производства листогибочных инструментов являются углеродистые и легированные стали. В зарубежной практике часто применяется сталь 42CrMo — это высокопрочная легированная сталь, которая прошла закалку и отпуск для получения высокой прочности и ударной вязкости. Она может работать при высоких и низких температурах и обладает высокой прочностью, ударной вязкостью и устойчивостью к износу. Из отечественных материалов наибольшее распространение для изготовления пуансонов и матриц листогибочных прессов получили инструментальные углеродистые (типа У8А) и низколегированные (типа Х12М) стали. Для улучшения механических характеристик технологический инструмент листогибочного прессы подвергается термической обработке, основным видом которой являются различные виды закалки. Повышение эксплуатационных свойств технологического инструмента ступенчатой гибки методом лазерного упрочнения рассмотрено в Главе 3.

7. Почти все применяемые инструменты для V-образной гибки оставляют на деформируемой детали некоторые следы — вмятины, царапины и другие нарушения поверхности. В большинстве случаев эти нарушения незначительны и приемлемы, при этом увеличение радиуса наконечника пуансона может существенно их уменьшить. Для применений, где недопустима даже минимальные

повреждения поверхности, например, при гибке предварительно окрашенных или отполированных материалов, можно использовать деформируемые мягкие (резиновые или нейлоновые) вставки для устранения царапин. Гибка листового материала без царапин особенно важна при изготовлении критически важных деталей самолетов и аппаратов аэрокосмической промышленности, поскольку при инспекции трудно визуально определить разницу между царапинами и трещинами. Для исключения повреждения поверхности деформируемого листа необходимо, чтобы максимальные контактные напряжения от воздействия пуансона не превышали допустимого напряжения смятия. В некоторых источниках даются общие соображения о выборе радиуса наконечника пуансона, но отсутствуют конкретные зависимости по его выбору. Методика определения радиуса наконечника пуансона при воздушной гибке листового металла изложена в разделе 2.4.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТУПЕНЧАТОЙ ГИБКИ ТОНКОЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА

2.1 Основы ступенчатой гибки тонколистовых материалов

Ступенчатая гибка (*Step Bending; bump Bending*) — это метод формирования большого радиуса изгиба в детали из листового металла путем создания последовательной серии V-образных изгибов в непосредственной близости друг от друга [38-41]. По сути метод представляет собой многократную V-гибку, осуществляемую методом воздушной гибки. Его преимуществом по сравнению с другими методами гибки является простота реализации и универсальность, а также отсутствие специальной технологической оснастки и сложного деформирующего оборудования.

Длина дуги изгиба $l_{\text{изг}}$ — это фактическая длина внутренней поверхности изгибаемого листа между двумя точками касания с прямолинейными участками (рисунок 2.1).

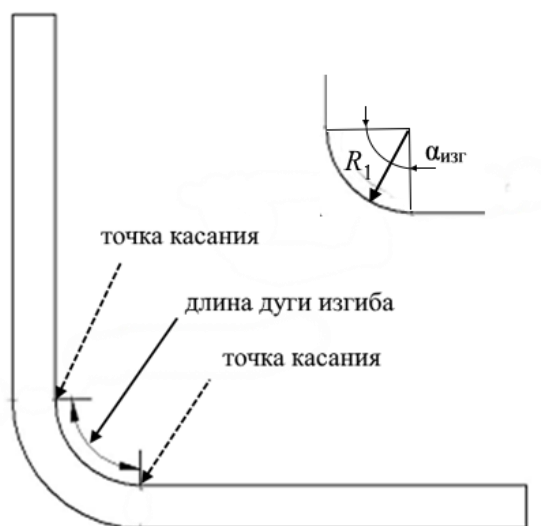


Рисунок 2.1 – Схема изгиба листового материала

Длина дуги может быть рассчитана по следующей формуле:

$$l_{\text{изг}} = \pi \cdot R_1 \cdot (\alpha_{\text{изг}}/180), \quad (2.1)$$

где $\alpha_{\text{изг}}$ — угол гибки, град; R_1 — внутренний радиус.

При ступенчатом изгибе дуга изгиба заменяется многоугольником, каждая сторона которого представляет собой прямолинейный участок листового материала заданной длины. На практике часто принимают эти участки одинаковыми, и тогда расстояние между каждым изгибом будет одинаковым с шагом $l_{\text{ступ}}$ и определяться по формуле:

$$l_{\text{ступ}} = \frac{l_{\text{изг}}}{Z_{\text{ступ}}}, \quad (2.2)$$

где $l_{\text{изг}}$ — длина дуги изгиба; $l_{\text{ступ}}$ — шаг (длина) ступени изгиба; $Z_{\text{ступ}}$ — количество ступеней (изгибов, граней).

Шаг (длина) ступени определяет количество изгибов, которые используются для формирования заданного радиуса изгиба при ступенчатой гибке. Чем больше шагов (ступеней) изгиба, тем более плавным получается профиль изогнутого листа (рисунок 2.2). Угол гибки $\alpha_{\text{ступ}}$, соответствующий одной ступени равен:

$$\alpha_{\text{ступ}} = \frac{\alpha_{\text{гиб}}}{Z_{\text{ступ}}}, \quad (2.3)$$

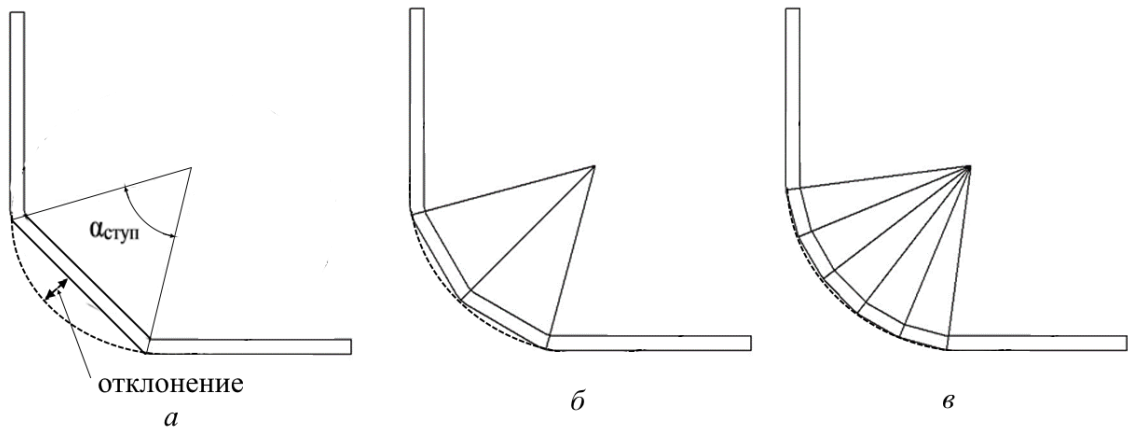
где $\alpha_{\text{ступ}}$ — угол гибки, соответствующий одной ступени; $\alpha_{\text{гиб}}$ — полный угол гибки листового материала; $Z_{\text{ступ}}$ — количество ступеней (шагов) гибки.

Шаг ступени $l_{\text{ступ}}$ — это расстояние между двумя последовательными изгибами. С точки зрения программирования гибочного пресса, это расстояние, на которое необходимо передвигать листовой материал после каждой ступени гибки (рисунок 2.3).

Из формулы следует, что угол изгиба $\alpha_{\text{ступ}}$ каждой ступени уменьшается при увеличении количества ступеней $Z_{\text{ступ}}$.

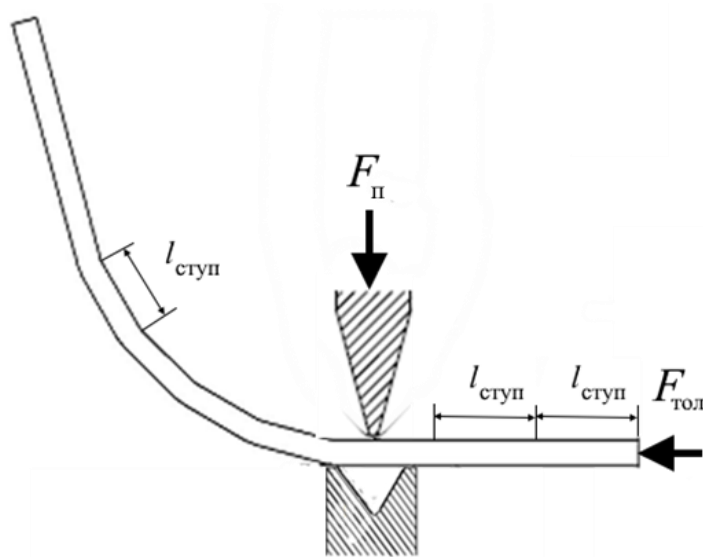
Например, для угла изгиба $\alpha_{\text{изг}} = 90^\circ$:

- при $Z_{\text{ступ}} = 2$ — $\alpha_{\text{ступ}} = 45^\circ$,
- при $Z_{\text{ступ}} = 3$ — $\alpha_{\text{ступ}} = 30^\circ$,
- при $Z_{\text{ступ}} = 4$ — $\alpha_{\text{ступ}} = 22,5^\circ$ и т.д.



a – число ступеней $Z_{\text{ст}} = 2$; $б$ – число ступеней $Z_{\text{ст}} = 3$; $в$ – число ступеней $Z_{\text{ст}} = 6$.

Рисунок 2.2 – Формирование радиуса изгиба листового материала методом ступенчатой гибки, где штриховой линией показан заданный круговой профиль изгиба



$l_{\text{ступ}}$ – шаг (длина) ступени изгиба; $F_{\text{п}}$ – усилие ступенчатой гибки (усилие пуансона); $F_{\text{тол}}$ – усилие толкателя.

Рисунок 2.3 – Схема ступенчатой гибки

Очевидно, что, чем больше число изгибов, тем более плавным получается формируемый профиль, но при этом процесс гибки становится более трудоемким и технически сложным. Поэтому от правильного выбора количество ступеней зависят технико-экономические показатели процесса. Следует также отметить, что

следы от ступенчатых изгибов будут более заметны на внутренней стороне изгибаемого листового материала по сравнению с внешней стороной.

2.2 Влияние числа ступеней гибки на точность получаемого профиля

Угол гибки $\alpha_{\text{ступ}}$, соответствующий одной ступени равен (рисунок 2.4)

$$\alpha_{\text{ступ}} = \frac{\alpha_{\text{гиб}}}{Z_{\text{ступ}}}, \quad (2.4)$$

где $\alpha_{\text{ступ}}$ - угол гибки, соответствующий одной ступени; $\alpha_{\text{гиб}}$ – полный угол гибки листового материала; $Z_{\text{ступ}}$ – количество ступеней (шагов) гибки.

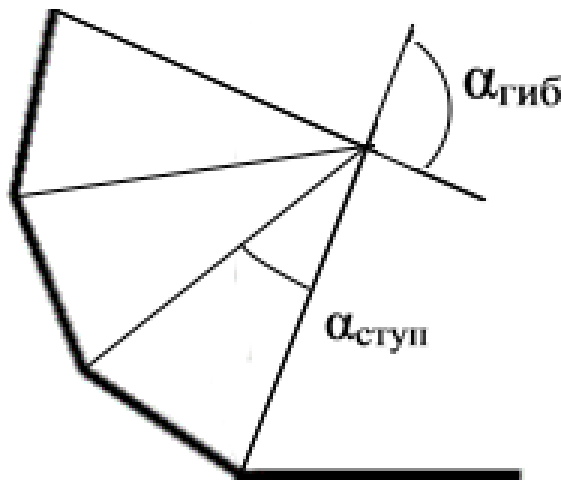


Рисунок 2.4 – Формирование радиуса изгиба листового материала методом ступенчатой гибки

Отклонение ΔR_2 реального (многогранного) наружного профиля листового материала при ступенчатой гибки от идеального профиля в виде окружности радиуса R_2 , будут равно (рисунок 2.5)

$$\Delta R_2 = R_2 - h = R_2 \cdot \left(1 - \cos \frac{\alpha_{\text{ступ}}}{2}\right) = R_2 \cdot \left(1 - \cos \frac{\alpha_{\text{гиб}}}{2 \cdot Z_{\text{ступ}}}\right), \quad (2.5)$$

где R_2 – радиус наружной поверхности изгибаемого листового материала;
 h – расстояние от центра окружности до наружной поверхности ступени.

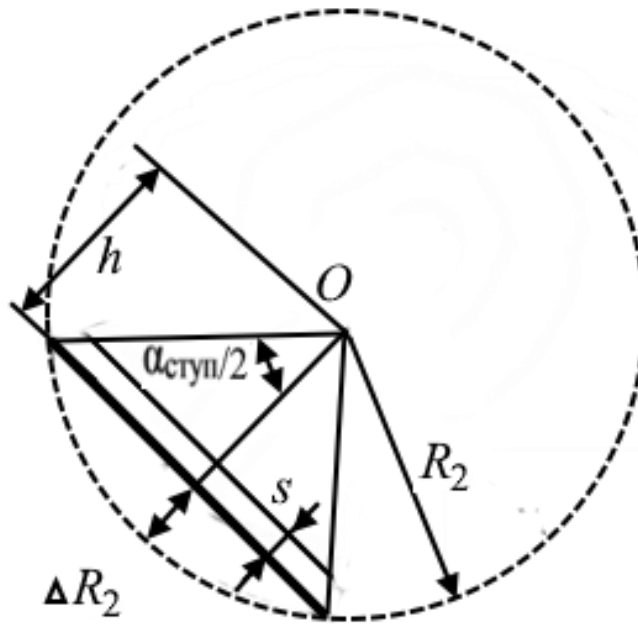


Рисунок 2.5 – Схема для определения отклонения многогранного наружного профиля листового материала от профиля в виде окружности

Для удобства практического использования полученное выражение целесообразно представить в следующем (безразмерном) виде [42]

$$\delta R = \frac{\Delta R_2}{R_2} = 1 - \cos \frac{\alpha_{\text{ступ}}}{2} = 1 - \cos \frac{\alpha_{\text{гнб}}}{2 \cdot z_{\text{ступ}}}. \quad (2.6)$$

Результаты расчета относительного отклонения профиля δR в зависимости от количества ступеней (шагов) при полном угле гибки листового материала 90° приведены в таблице 2.1.

Зависимости относительного отклонения δR многогранного профиля от количества ступеней и от угла гибки ступени показаны на рисунках 2.6 и 2.7.

В результате математической обработки полученных данных установлено, что эти зависимости очень хорошо описываются степенными функциями, которые показаны на представленных графиках:

$$\delta R \cong \frac{0,3}{z_{\text{ступ}}^2}; \quad \delta R \cong 0,0002 \cdot \alpha_{\text{ступ}}^2. \quad (2.7)$$

Таблица 2.1 – Зависимость относительного отклонения δR многогранного профиля от количества ступеней при угле гибки 90°

Количество ступеней $Z_{\text{ступ}}$	Угол гибки ступени $\alpha_{\text{ступ}}$, град	Относительное отклонение δR
1	90,00	0,2926
2	45,00	0,0760
4	22,50	0,0192
6	15,00	0,0085
8	11,25	0,0048
10	9,00	0,0031
12	7,50	0,0021
14	6,43	0,0016
16	5,63	0,0012
18	5,00	0,0010
20	4,50	0,0008
30	3,00	0,0003

Выбор количества ступеней зависит от требований технического задания на профиль изгибаемого листа. В качестве примера в таблице 2.2 приведены результаты расчета относительного δR и абсолютного ΔR_2 отклонения многогранного профиля от количества ступеней при угле гибки 90° и радиусе гибки $R_2 = 100$ мм. Там же для некоторых случаев показаны значения ближайших допусков линейных размеров по ГОСТ 25346-2013 [43].

Полученные результаты использованы при разработке технологических режимов ступенчатой гибки для производства корпусных деталей, приведенных в главе 4.

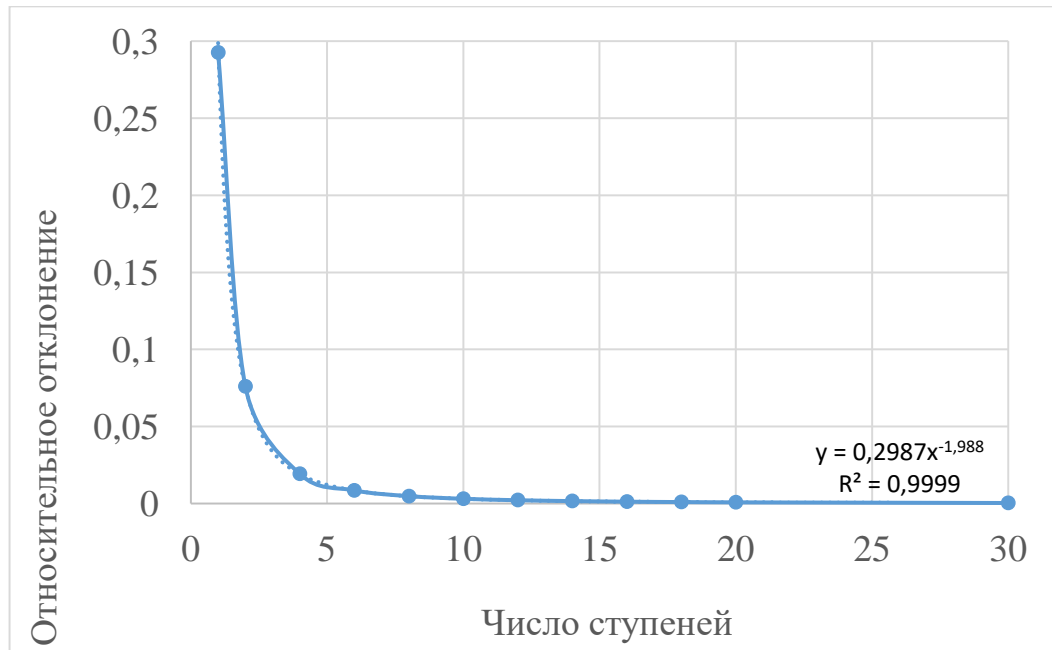


Рисунок 2.6 – Зависимость относительного отклонения δR многогранного профиля от количества ступеней при полном угле гибки 90°

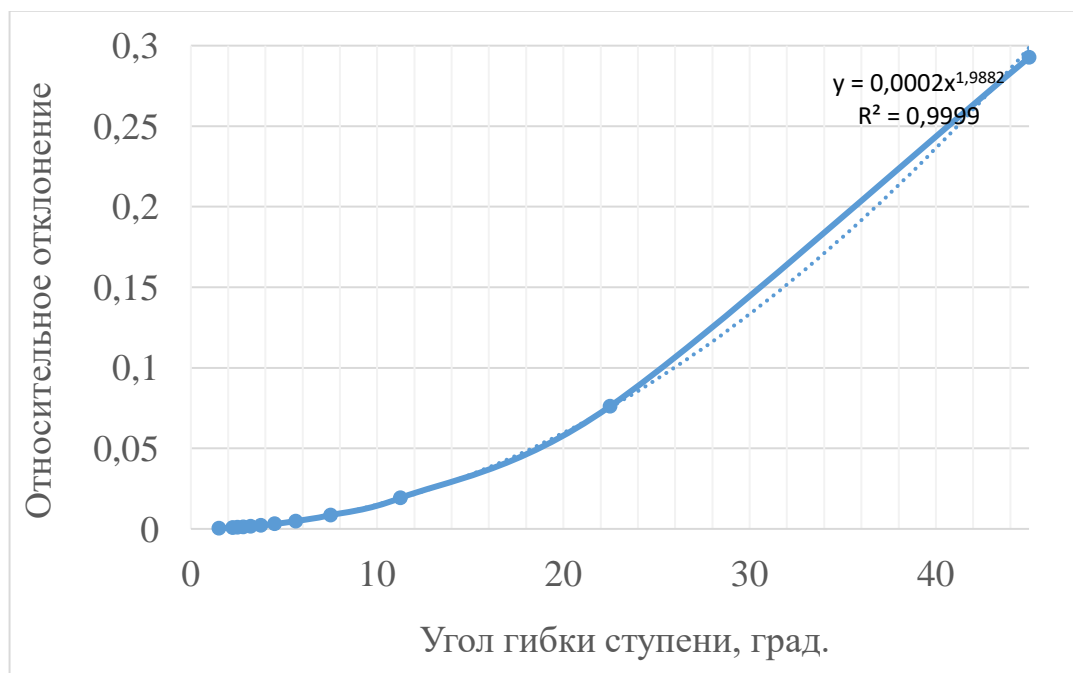


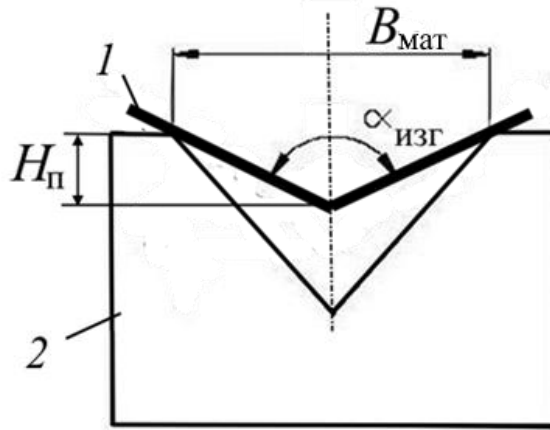
Рисунок 2.7 – Зависимость относительного отклонения δR многогранного профиля от угла гибки ступени

Таблица 2.2 – Зависимость относительного δR и абсолютного ΔR_2 отклонения многогранного профиля от количества ступеней при полном угле гибки 90° и радиусе гибки $R_2 = 100$ мм

Количество ступеней	Угол гибки ступени, град.	Отклонение профиля		Допуск размера	
		относительное	мм	обозначение	мм
1	90,00	0,2926	29,2612		
2	45,00	0,0760	7,6044		
4	22,50	0,0192	1,9195	h16	2,2000
6	15,00	0,0085	0,8546	h14	0,8700
8	11,25	0,0048	0,4810		
10	9,00	0,0031	0,3080	h12	0,3500
12	7,50	0,0021	0,2139	h11	0,2200
14	6,43	0,0016	0,1572		
16	5,63	0,0012	0,1203		
18	5,00	0,0010	0,0951	h9	0,0870
20	4,50	0,0008	0,0770		
30	3,00	0,0003	0,0342	h7	0,0350

2.3 Определение хода пуансона при ступенчатой гибке

В методе свободной или воздушной гибке, который используется при ступенчатой гибке, присутствует воздушный зазор между листом и стенками V-образной матрицы (рисунок 2.8). Верхний башмак (траверса) прессы вдавливают лист на выбранную глубину H_n в паз матрицы с помощью пуансона, при этом лист находится «в воздухе» и не соприкасается со стенками матрицы [44-45]. Поэтому угол гибки $\alpha_{изг}$ определяется в основном положением, а не геометрией гибочного инструмента (пуансона). На современном прессе точность настройки составляет 0,01 мм.



1 – листовой материал; 2 – матрица (пуансон не показан).

Рисунок 2.8 – Схема определения угла изгиба листового материала при воздушной гибке

Из рисунка видно, что угол гибки ступени $\alpha_{\text{ступ}}$ можно определить по следующей формуле [46]

$$\alpha_{\text{ступ}} = 2 \cdot \arctg \left(\frac{B_{\text{мат}}}{2 \cdot H_{\text{п}}} \right), \quad (2.8)$$

где $H_{\text{п}}$ – ход пуансона; $B_{\text{мат}}$ – ширина паза (расстояния между рабочими кромками) матрицы; $\alpha_{\text{ступ}}$ – угол гибки, соответствующий одной ступени.

Результаты расчета угла гибки ступени в зависимости от отношения ширины паза матрицы к ходу (глубине проникновения) пуансона $B_{\text{м}}/(2 \cdot H_{\text{п}})$ приведены в таблице 2.3 и на рисунках 2.9 и 2.10.

Таблица 2.3 – Зависимость угла гибки ступени $\alpha_{\text{ступ}}$ в зависимости от отношения полуширины паза матрицы к ходу пуансона $B_{\text{мат}}/(2 \cdot H_{\text{п}})$

$B_{\text{мат}}/(2 \cdot H_{\text{п}})$	Угол гибки ступени		Количество ступеней
	радиан	градус	
0,20	0,3948	22,63	3,98
0,10	0,1993	11,43	7,88
0,08	0,1597	9,15	9,83
0,06	0,1199	6,87	13,10
0,04	0,0800	4,58	19,64
0,02	0,0400	2,29	39,26

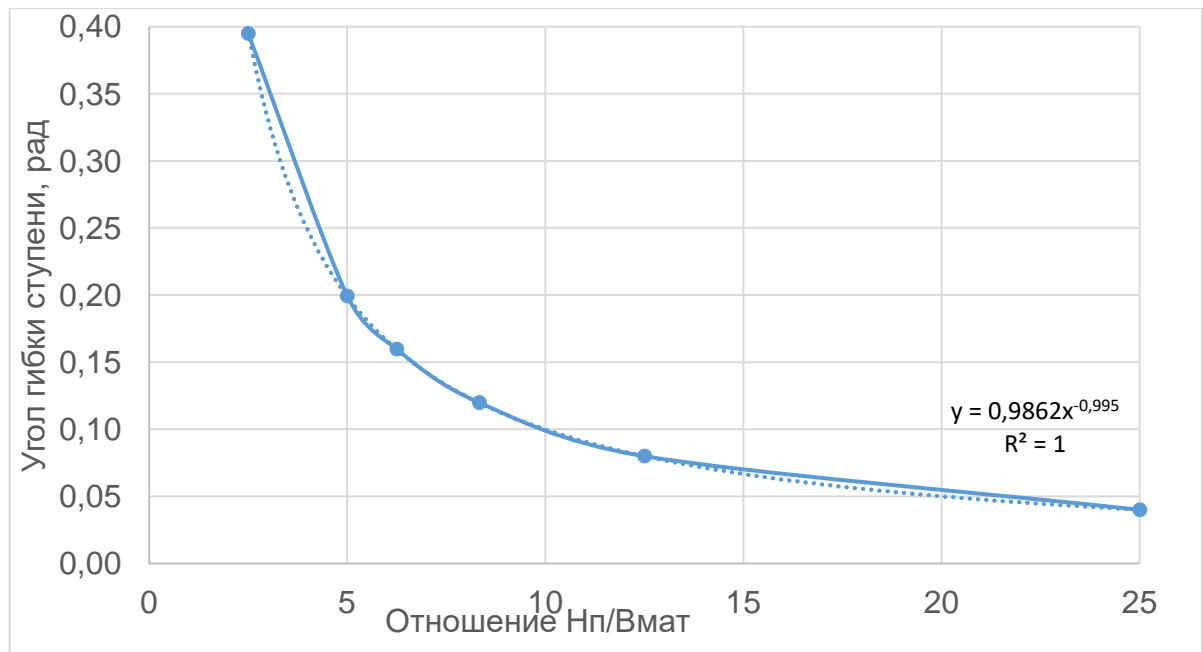


Рисунок 2.9 – Зависимость угла гибки $\alpha_{\text{ступ}}$ [радиан] соответствующего одной ступени, от отношения хода пуансона к ширине паза матрицы $H_{\text{п}}/B_{\text{мат}}$

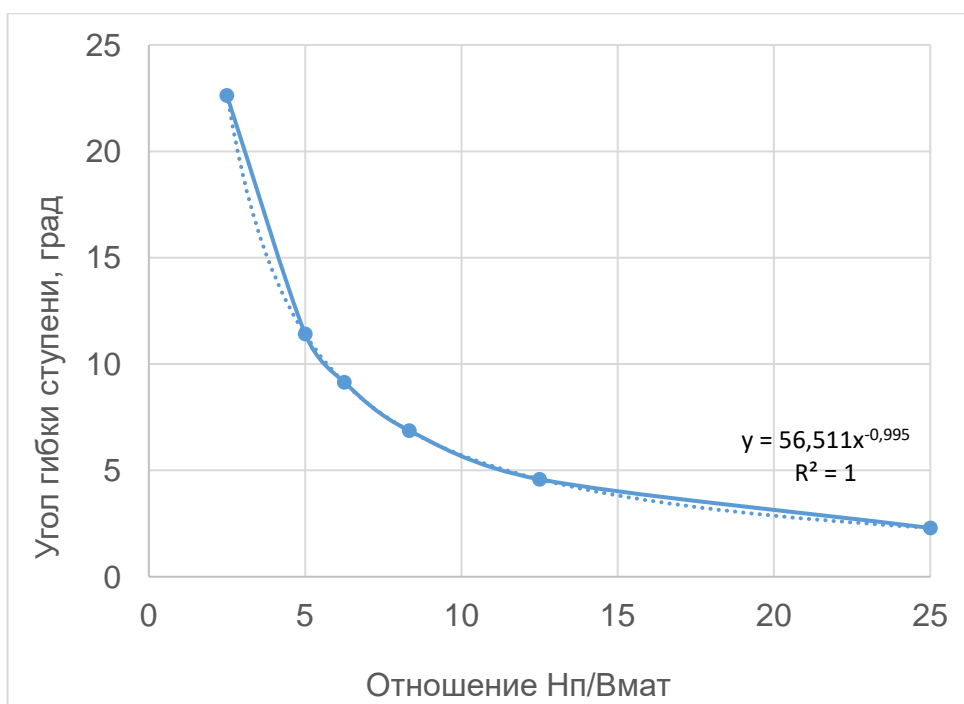


Рисунок 2.10 – Зависимость угла гибки $\alpha_{\text{ступ}}$ [градус] соответствующего одной ступени, от отношения хода пуансона к ширине паза матрицы $H_{\text{п}}/B_{\text{мат}}$

Из формулы (2.8) следует, что ход пуансона $H_{\text{п}}$ и угол гибки $\alpha_{\text{ступ}}$, соответствующий заданному положению пуансона, связаны следующей зависимостью:

$$H_n = \frac{B_{\text{мат}}}{2 \cdot \text{tg}\left(\frac{\alpha_{\text{ступ}}}{2}\right)} = \frac{B_{\text{мат}}}{2 \cdot \text{tg}\left(\frac{\alpha_{\text{гиб}}}{2 \cdot Z_{\text{ступ}}}\right)}, \quad (2.9)$$

где $\alpha_{\text{ступ}}$ – угол гибки, соответствующий одной ступени; $\alpha_{\text{гиб}}$ – полный угол гибки листового материала; $Z_{\text{ступ}}$ – количество ступеней (шагов) гибки.

Результаты расчета по формуле (2.9), приведенные на рисунках 2.11 и 2.12, показывают, что зависимость отношения хода пуансона к ширине паза матрицы $H_{\text{п}}/B_{\text{мат}}$ от количества ступеней можно описать линейной значимостью (соответствующие формулы приведены на рисунках).

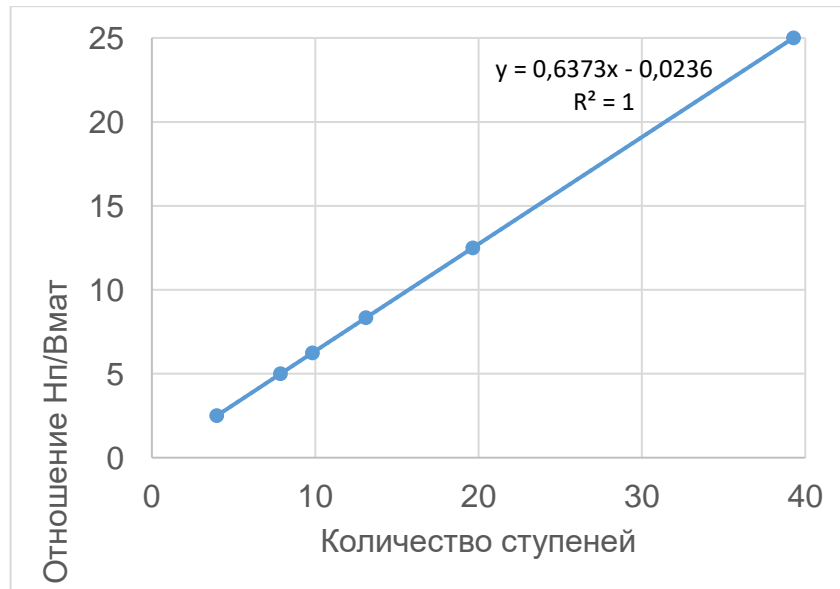


Рисунок 2.11 – Зависимость отношения хода пуансона к ширине паза матрицы

$H_{\text{п}}/B_{\text{м}} от количества ступеней$

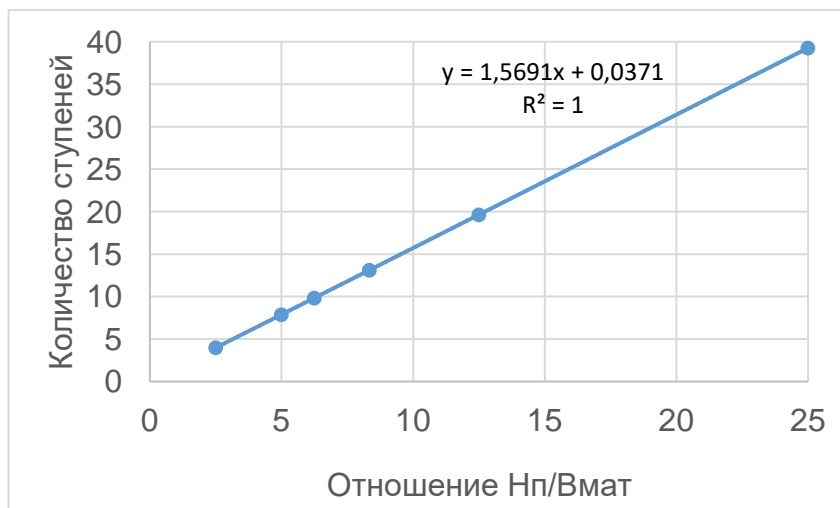


Рисунок 2.12 – Зависимость количества ступеней от отношения хода пуансона к ширине паза матрицы $H_{\text{п}}/B_{\text{м}}$ от количества ступеней

Для удобства практического использования выражение для хода пуансона целесообразно представлено в безразмерном виде путем введения относительных значений ширины паза матрицы $B_{\text{мат}}^* = B_{\text{мат}}/s$ и хода пуансона $H_{\text{п}}^* = H_{\text{п}}/s$. С учетом этих выражений формула для определения хода пуансона (глубины проникновения пуансона в матрицу) принимает следующий вид:

$$H_n^* = \frac{H_n}{s} = \frac{(B_{\text{мат}}/s)}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_{\text{гиб}}}{2 \cdot Z_{\text{ступ}}}\right)} = \frac{B_{\text{мат}}^*}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_{\text{гиб}}}{2 \cdot Z_{\text{ступ}}}\right)}, \quad (2.10)$$

где s – толщина листового материала; $B_{\text{мат}}^*$ – относительное (безразмерное) значение ширины паза матрицы; H_n^* – относительное (безразмерное) значение хода пуансона; $Z_{\text{ступ}}$ – количество ступеней (шагов) гибки.

На практике приведенные зависимости приходится корректировать с учетом физико-механических свойств деформируемого материала (упругость, однородность, направление волокон), конструктивных особенностей технологического инструмента и возможностей гибочного пресса.

В качестве примера на рисунке 2.13 приведены результаты расчета относительного хода пуансона H_n/s от количества ступеней (шагов) гибки $Z_{\text{ступ}}$ при полном угле гибки $\alpha_{\text{гиб}} = 90^\circ$ для часто применяемых отношений паза матрицы к толщине листового материала $B_{\text{мат}}/s$: 4, 8, 12, 16, 20.

Расчеты показали, что зависимость относительного хода пуансона H_n/s от количества ступеней (шагов) гибки $Z_{\text{ступ}}$ носит линейный характер (уравнения приведены на рисунке), при этом с увеличением отношения паза матрицы к толщине листового материала $B_{\text{мат}}/s$ растет ход пуансона (глубине проникновения пуансона в матрицу).

Таким образом, зависимость относительного хода пуансона H_n/s от количества ступеней (шагов) гибки $Z_{\text{ступ}}$ можно представить в следующем виде:

$$H_n/s = a \cdot Z_{\text{ступ}} - b, \quad (2.11)$$

где a и b – коэффициенты, зависящие от отношений паза матрицы к толщине листового материала $B_{\text{мат}}/s$ (см. рисунок 2.13).

Из приведенных данных видно, что зависимость коэффициентов уравнения (2.10) от отношения паза матрицы к толщине листового материала $B_{\text{мат}}/s$ носит линейный характер (уравнения приведены на рисунке 2.13).

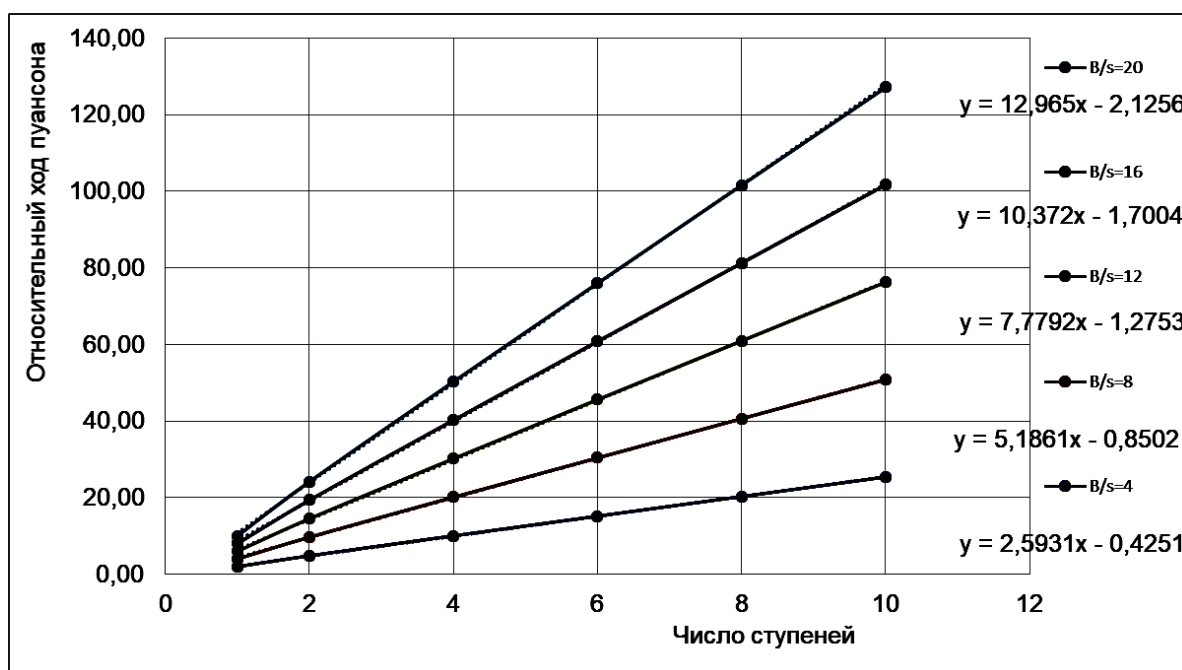


Рисунок 2.13 – Зависимость относительного хода пуансона $H_{\text{п}}/s$ от количества ступеней (шагов) гибки $Z_{\text{ступ}}$ при различных отношениях паза матрицы к толщине листового материала $B_{\text{мат}}/s$ при полном угле гибки $\alpha_{\text{гиб}} = 90^\circ$

Таким образом, зависимость относительного хода пуансона $H_{\text{п}}/s$ от количества ступеней (шагов) гибки $Z_{\text{ступ}}$ и отношения паза матрицы к толщине листового материала $B_{\text{мат}}/s$ можно представить в следующем виде:

$$H_{\text{п}}/s = (B_{\text{мат}}/s) \cdot [0,65 \cdot Z_{\text{ступ}} - 0,106] \quad (2.12)$$

Полученное выражение успешно использованы при определении параметров ступенчатой гибки для производства ряда корпусных деталей.

На основе анализа процесса ступенчатой (шаговой) гибки листового материала получена зависимость относительного хода пуансона $H_{\text{п}}/s$ от количества ступеней (шагов) гибки $Z_{\text{ступ}}$ при полном угле гибки $\alpha_{\text{гиб}} = 90^\circ$ для часто применяемых отношений паза матрицы к толщине листового материала $B_{\text{мат}}/s$: 4, 8, 12, 16, 20. Полученные результаты использованы при определении параметров ступенчатой гибки для производства ряда корпусных деталей.

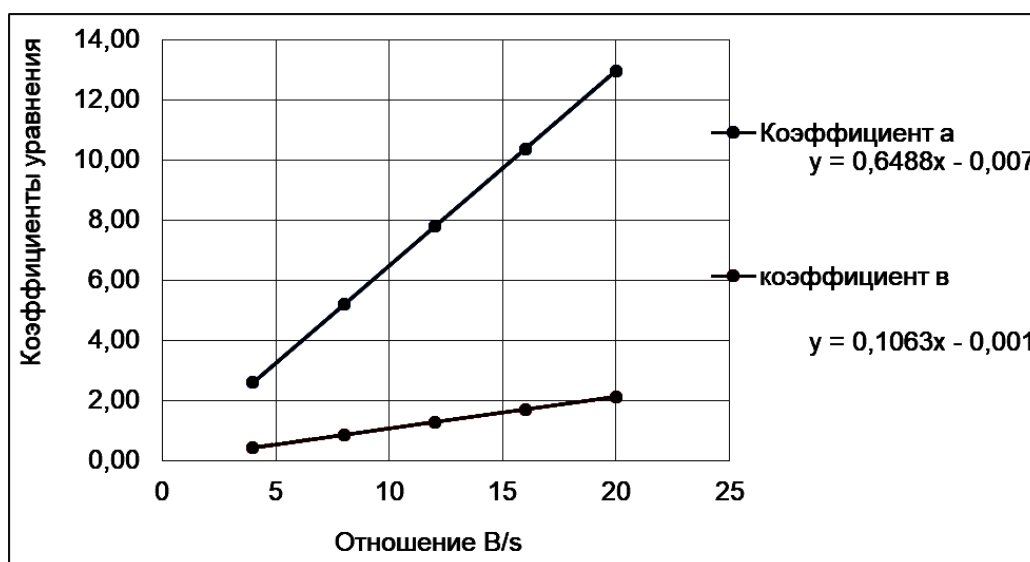


Рисунок 2.14 – Зависимость коэффициентов уравнения (2.11) от отношения паза матрицы к толщине листового материала $B_{\text{мат}}/s$

2.4 Определение радиуса наконечника пуансона при воздушной гибке листового металла

Во многих отраслях промышленности широко используются различные тонкостенные детали (сосуды и другие емкости, котлы, барабаны, детали летательных аппаратов и др.) изготовленные из металлических листов [47]. При этом одним из наиболее эффективных и экономичных способов обработки давлением, применяемого при их производстве, является листовая штамповка, и, в частности, гибка, при которой изменяется кривизна листовой заготовки в плоскости изгиба с целью получения деталей пространственной формы. В большинстве случаев для холодной штамповки применяются низкоуглеродистые стали высокой пластичности и свариваемости с содержанием углерода 0,05–0,4 %. Наиболее широко применяют листовой прокат из углеродистой стали обыкновенного качества марок Ст0–Ст6 толщиной 0,5...4,0 мм. Для изготовления деталей оборудования для пищевой и медицинской промышленности часто используют нержавеющие стали типа 12Х18Н9Т, которые обладают удовлетворительной штампуемостью, высоким относительным удлинением и

благоприятным для штамповки отношением предела текучести к временному сопротивлению.

Применительно к классу тонкостенных деталей одинарной кривизны в производстве используются ряд способов формоизменения: гибка в инструментальных штампах на кривошипных и эксцентриковых прессах; свободная гибка в универсальных штампах на специальных гибочных прессах; гибка-прокатка на валковых станках; гибка с растяжением на специальных профилегибочных станках и др. В данном разделе рассматриваются вопросы изготовления тонкостенных корпусов небольших устройств мелкосерийного или единичного производства с использованием воздушной гибки, при которой присутствует воздушный зазор между листом и стенками V-образной матрицы [48-50].

В процессе V-образной гибки технологический инструмент оставляет на поверхности деформируемой детали некоторые следы – вмятины, царапины и другие повреждения поверхности. Как правило, эти нарушения незначительны и в большинстве случаев приемлемы, но при необходимости их можно существенно уменьшить путём увеличения радиуса рабочих кромок пуансона и матрицы. В тех случаях, когда недопустимы даже минимальные повреждения поверхности (например, при формоизменении предварительно окрашенных или отполированных материалов) для устранения царапин при гибке можно использовать резиновые или нейлоновые вставки. Гибка листового материала без царапин особенно важна при изготовлении критически важных деталей летательных аппаратов, поскольку при визуальном контроле качества поверхности трудно установить различие между трещинами и царапинами.

Чтобы избежать при V-образной гибке повреждения технологическим инструментом поверхности металлического листа необходимо, чтобы максимальные контактные напряжения $\sigma_{\text{кон}}$, которые возникают при воздействии пуансона на листовую деформируемый металл, не превышали допустимого напряжения смятия $[\sigma_{\text{см}}]$, т.е.:

$$\sigma_{\text{кон}} \leq [\sigma_{\text{см}}], \quad (2.13)$$

В процессе работы различных механизмов нагрузка часто передается от одной детали к другой через общую контактную поверхность (болтовые, заклепочные, шпоночные, шлицевые соединения, детали муфт и др.). В подобных случаях необходима оценка прочности деталей на смятие.

Допускаемые напряжение на смятие устанавливаются опытным путем и часто принимаются равными [51-52]

$$[\sigma_{\text{см}}] = (2,0 \dots 2,5) \cdot [\sigma_{\text{сж}}],$$

где $[\sigma_{\text{сж}}]$ - допускаемые напряжение на сжатие.

Информация о допускаемых напряжениях смятия $[\sigma_{\text{см}}]$ для некоторых конструкционных материалов, можно найти в справочной литературе; обычно она содержится в табличной форме в зависимости от значений предела текучести или временного сопротивления. Например, в работе [53] при расчете деталей резьбовых соединений, выполненных из сталей, рекомендуется принимать $[\sigma_{\text{см}}] = 0,8 \cdot \sigma_m$, а при расчете шлицевых соединений – $[\sigma_{\text{сж}}] = (0,028 \dots 0,032) \cdot \text{НВ}$.

Для пластичных материалов в условиях статического нагружения в работах [54-55] допускаемые напряжения смятия предложена следующая зависимость:

$$[\sigma_{\text{см}}] = \frac{1,5 \cdot \sigma_T}{0,23 + 2,65 \cdot (\sigma_T / \sigma_B)}, \quad (2.14)$$

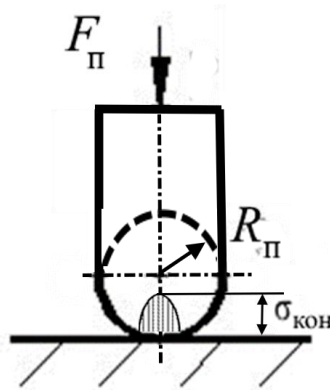
где σ_T – предел текучести материала, σ_B – временное сопротивление материала.

Для определения максимальных контактных напряжений $\sigma_{\text{кон}}$ наконечник пуансона представим в виде цилиндра радиусом $R_{\text{п}}$. (рисунок 2.15). При давлении цилиндра на листовый материал контакт происходит по узкой площадке, при этом точки максимальных нормальных напряжений $\sigma_{\text{кон}}$ располагаются на продольной

оси симметрии контактной площадки, а их значение можно вычислить по формуле Герца -Беляева [56-57].

$$\sigma_{\text{кон}} = \sqrt{\frac{F_{\text{п}}}{L_{\text{кон}} \cdot R_{\text{п}}} \cdot \frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2}{\pi \cdot [E_1 \cdot (1 - \mu_1^2) + E_2 \cdot (1 - \mu_2^2)]}} \quad (2.15)$$

где $F_{\text{п}}$ – усилие гибки (усилие пуансона); $L_{\text{кон}}$ – длина контактной линии; $R_{\text{п}}$ – радиус цилиндра (наконечника пуансона), μ и E – коэффициенты Пуассона и модули упругости материалов контактирующих тел (индексы 1 и 2 относятся к материалам пуансона и деформируемого листа соответственно).



$F_{\text{п}}$ – усилие гибки (усилие пуансона); $R_{\text{п}}$ – радиус цилиндра (наконечника пуансона); $\sigma_{\text{кон}}$ – максимальное давление (напряжение) в зоне контакта.

Рисунок 2.15 – Схема контакта цилиндра с плоскостью

Усилие при воздушной гибке необходимо знать для определения мощности привода гибочного пресса и выбора технологической оснастки для осуществления процесса ступенчатой гибки. Величина усилия зависит от механических свойств и поперечного сечения заготовки, радиуса кривизны и угла изгиба, создаваемых в процессе формоизменения [3, 10, 15].

Расчетная схема для определения усилия воздушной гибки приведена на рисунке 2.16, из которой следует, что на деформируемую заготовку действуют следующие силы:

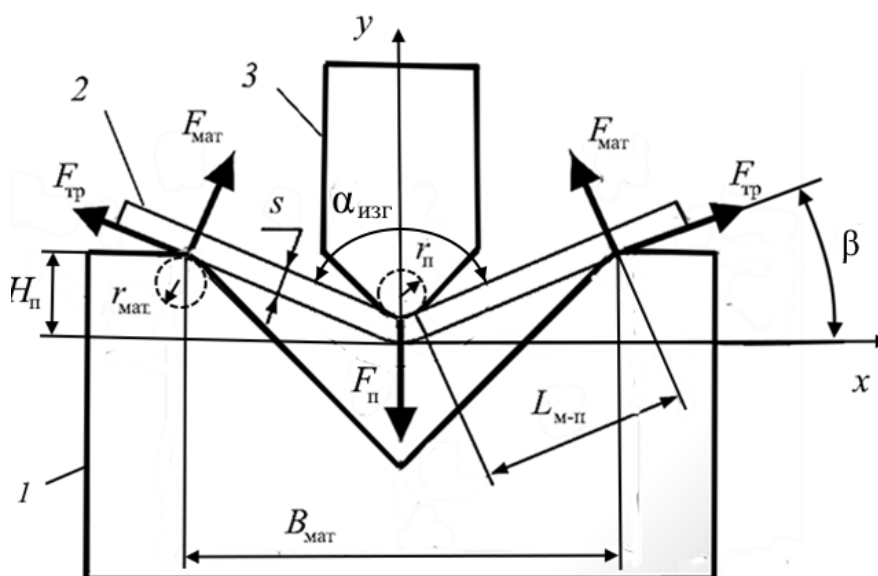
- активная сила давления пуансона $F_{\text{п}}$;

- сила реакции $F_{\text{мат}}$ со стороны матрицы;
- силы трения $F_{\text{тр}}$, возникающие в результате скольжения изгибаемой заготовки относительно опор матрицы.

Сила трения определяется по формуле:

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{мат}} \cdot f, \quad (2.16)$$

где f – коэффициент трения между изгибаемым листом и матрицей.



1 – матрица; 2 – листовой материал; 3 – пуансон.

Рисунок 2.16 – Расчетная схема для определения усилия воздушной гибки

Проектируя все силы на направление действия силы $F_{\text{п}}$, получаем уравнение равновесия в следующем виде:

$$\sum F_{iy} = 0; \quad F_{\text{мат}} \cdot \cos \alpha + F_{\text{тр}} \cdot \sin \alpha - (F_{\text{п}}/2) = 0, \quad (2.17)$$

где $F_{\text{мат}}$ – сила реакции опоры (матрицы), $F_{\text{тр}}$ – сила трения между изгибаемым листом и матрицей, $F_{\text{п}}$ – сила давления пуансона; β – угол изгиба листового материала относительно поверхности матрицы.

Угол изгиба связан с полным углом изгиба $\alpha_{\text{изг}}$ зависимостью:

$$\beta = (180^0 - \alpha_{\text{изг}})/2 = 90^0 - (\alpha_{\text{изг}}/2). \quad (2.18)$$

Из приведенных формул следует, что сила реакции матрицы равна:

$$F_{\text{мат}} = \frac{F_n}{2 \cdot (\cos \beta + f \cdot \sin \beta)}. \quad (2.19)$$

Момент внешних сил относительно точки касания пуансона к листу равен (см. рисунок 2.16):

$$M_{\text{м-п}} = F_{\text{мат}} \cdot L_{\text{м-п}} + F_{\text{тр}} \cdot s = F_{\text{мат}} \cdot (L_{\text{м-п}} + f \cdot s). \quad (2.20)$$

Здесь $L_{\text{м-п}}$ - размер участка заготовки между точками касания матрицы и пуансона, который можно определить по формуле:

$$L_{\text{м-п}} = \frac{0,5 \cdot B_{\text{мат}} - (r_{\text{мат}} + r_n + s) \cdot \sin \beta}{\cos \beta}. \quad (2.21)$$

Изгибающий момент внутренних сил:

$$M_{\text{изг}} = W_{\text{изг}} \cdot \sigma_m \cdot K_{\text{упр}}, \quad (2.22)$$

где $W_{\text{изг}}$ – момент сопротивления сечения заготовки; $K_{\text{упр}}$ – коэффициент, учитывающий упрочнение металла при изгибе, зависит от механических свойств металла и относительного радиуса изгиба; $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести металла заготовки.

Для прямоугольного сечения листа момент сопротивления сечения заготовки при пластическом изгибе материала без упрочнения равен [10, 15].

$$W_{\text{изг}} = \frac{l_{\text{изг}} \cdot s^2}{4}, \quad (2.23)$$

где $l_{\text{изг}}$ – длина линии изгиба (ширина листового материала), s – толщина листового материала.

Из условия равенства моментов внутренних (2.22) и внешних (2.20) сил с учетом (2.21) получим выражение для определения усилия гибки:

$$F_n = \frac{L_{\text{рез}} \cdot s^2 \cdot \sigma_m \cdot K_{\text{упр}} \cdot (\cos \beta + f \cdot \sin \beta)}{2 \cdot \left\{ f \cdot s + \left[\frac{(0,5 \cdot B_{\text{мат}}) - (r_{\text{мат}} + r_n + s) \cdot \sin \beta}{\cos \beta} \right] \right\}} \quad (2.24)$$

где F_n – усилие гибки (усилие пуансона); $L_{\text{изг}}$ – длина линии изгиба (ширина листового материала); s – толщина листового материала; σ_t – предел текучести материала заготовки; $K_{\text{упр}}$ – коэффициент, учитывающий упрочнение металла при изгибе; β – угол изгиба листового материала (2.4.5); f – коэффициент трения между изгибаемым листом и матрицей; $B_{\text{мат}}$ – расстояние между центрами скругления рабочих кромок матрицы; r_n – радиус наконечника пуансона; $r_{\text{мат}}$ – радиус рабочих кромок матрицы.

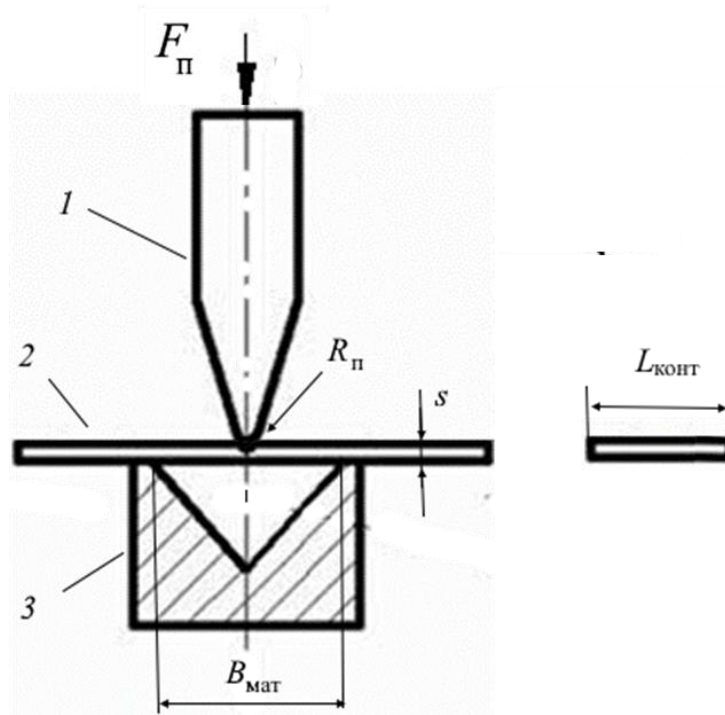
Увеличение угла изгиба $\alpha_{\text{изг}}$ сопровождается уменьшением усилия F_n , что объясняется существованием зависимости между геометрическими параметрами формы изгиба и шириной ручья матрицы $B_{\text{мат}}$. При данном радиусе кривизны получить большой угол изгиба возможно лишь на матрице с большой шириной ручья, а этому соответствует меньшее усилие формоизменения. Поэтому при постоянстве радиуса кривизны, увеличение угла изгиба α сопровождается уменьшением потребного усилия гибки.

В начальной стадии воздушной гибки $\alpha = 180^\circ$ и $\beta = 0$ (рисунок 2.17); поэтому формула (2.24) принимает более простой вид [3, 28, 58, 59, 135]:

$$F_n = \frac{\sigma_m \cdot L_{\text{изг}} \cdot s^2 \cdot K_{\text{упр}}}{B_{\text{мат}}} \quad (2.25)$$

Подставляя в формулу (2.15) полученное выражение для усилия гибки (2.25), с учетом соотношения (2.14) получим:

$$0,798 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_m \cdot s^2}{2 \cdot B_{\text{мат}} \cdot R_{II} \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}} \leq \frac{1,5 \cdot \sigma_m}{0,23 + 2,65 \cdot \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_\epsilon} \right)} \quad (2.26)$$



1 – пуансон, 2 – листовый материал, 3 – матрица; $F_{\text{п}}$ – усилие гибки (усилие пуансона); $R_{\text{п}}$ – радиус цилиндра (наконечника пуансона); s – толщина листового материала; $B_{\text{мат}}$ – ширина паза матрицы; $L_{\text{кон}}$ – длина контактной линии.

Рисунок 2.17 – Схема начальной стадии воздушной гибки

Подставляя в формулу (2.13) полученное выражение для максимальных контактных напряжений $\sigma_{\text{кон}}$ (2.15) с учетом соотношения (2.14) получим:

$$R_n \geq [R_n] \approx \frac{s^2 \cdot [0,23 + 2,65 \cdot (\sigma_m / \sigma_6)]^2}{70 \cdot B_{\text{мат}} \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \cdot \sigma_m}, \quad (2.27)$$

где $[R_{\text{п}}]$ – допускаемый радиус пуансона, т.е. минимальное значение радиуса, при котором не происходит смятие поверхности деформируемого металла.

Применение выведенной зависимости рассмотрим на примере трех материалов, которые часто применяются для изготовления тонкостенных корпусов небольших устройств мелкосерийного или единичного производства [60] (таблица 2.4). В качестве материала пуансона использована легированная инструментальная штамповая сталь марки X12M, которая широко используется в

различных отраслях промышленности для изготовления технологического инструмента, предназначенного для холодной деформации металлов.

Таблица 2.4 – Характеристики использованных материалов [60]

Материал	Физико-механические характеристики			
	$\sigma_{\text{ТВ}}$, МПа	$\sigma_{\text{В}}$, МПа	E , ГПа	μ
Сталь X18H10T	215	530	198	0,31
Сталь Ст3	205	455	205	0,28
Сплав АМг3	120	230	71	0,30

В результате расчетов получены зависимости допускаемого радиуса пуансона $[R_{\text{п}}]$:

- от толщины листового материала при относительном расстоянии между рабочими кромками (ширине паза) матрицы $B_{\text{мат}}/s = 8$ (рисунок 2.18);
- от расстояния между рабочими кромками (ширины паза) матрицы $B_{\text{мат}}$ для листового материала толщиной $s = 2$ мм (рисунок 2.19);
- от относительного расстояния между рабочими кромками (ширины паза) матрицы $B_{\text{мат}}/s$ (рисунок 2.20).

Зависимость допускаемого радиуса пуансона $[R_{\text{п}}]$ от толщины листового материала носит линейный характер (уравнения приведены на рисунке), при этом для более прочного металла можно использовать пуансон с меньшим радиусом наконечника (см. рисунок 2.18). Так, при толщине листа $s = 5$ мм и ширине паза матрицы $B_{\text{мат}} = 4 \cdot s$ для нержавеющей стали X18H10T с временным сопротивлением $\sigma_{\text{В}} = 530$ МПа допускаемый радиус пуансона $[R_{\text{п}}] = 2,89$ мм, а для углеродистой стали обыкновенного качества Ст3 с $\sigma_{\text{В}} = 455$ МПа - $[R_{\text{п}}] = 4,64$ мм.

Зависимость допускаемого радиуса пуансона $[R_{\text{п}}]$ от расстояния между рабочими кромками (ширины паза) матрицы $B_{\text{мат}}$ подчиняется степенному закону (уравнения приведены на рисунке 2.19), при этом также для менее прочного

металла надо применить пуансоны с большим радиусом наконечника (см. рисунок 2.19). Так, при толщине листа $s = 2$ мм и ширине паза матрицы $B_{\text{мат}} = 16$ мм для углеродистой стали обыкновенного качества Ст3 с ременным сопротивлением $\sigma_{\text{в}} = 455$ МПа допускаемый радиус пуансона $[R_{\text{п}}] = 1,85$ мм, а для нержавеющей стали X18H10T с $\sigma_{\text{в}} = 530$ МПа - $[R_{\text{п}}] = 1,16$ мм.

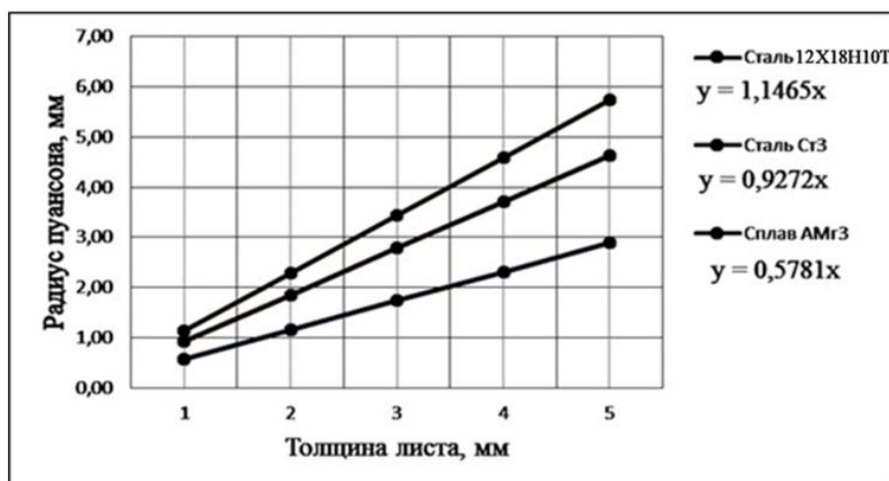


Рисунок 2.18 – Зависимость допускаемого радиуса пуансона $[R_{\text{п}}]$ от толщины листового материала при расстоянии между рабочими кромками (ширине паза) матрицы $B_{\text{мат}} = 4 \cdot s$.

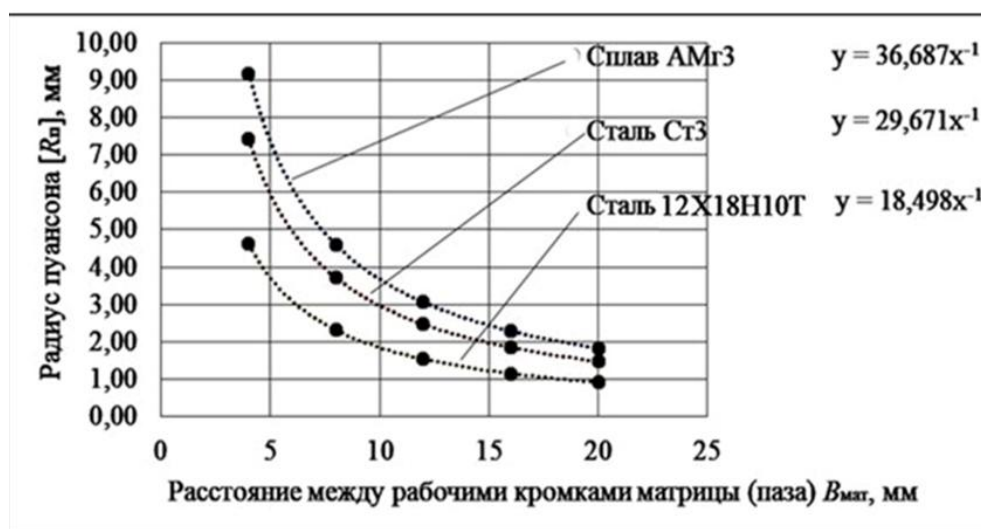


Рисунок 2.19 – Зависимость допускаемого радиуса пуансона $[R_{\text{п}}]$ от расстояния между рабочими кромками (ширины паза) матрицы $B_{\text{мат}}$

Зависимость допускаемого радиуса пуансона $[R_{\text{п}}]$ от расстояния между рабочими кромками (ширины паза) матрицы $B_{\text{мат}}$ можно представить в более универсальном виде, если вместо абсолютного значения радиуса использовать относительный (безразмерный) радиус $[R_{\text{п}}]/s$ (см. рисунок 2.20).

Научную новизну представляет методика определения допускаемого радиуса пуансона, при котором не происходит смятие поверхности деформируемого листового металла в процессе гибки. Предложенный подход успешно использован при определении параметров ступенчатой гибки тонколистового металла, выполненного из малоуглеродистой и коррозионностойкой сталей. Тем не менее на практике приведенную теоретическую зависимость иногда приходится корректировать с учетом физико-механических свойств деформируемого материала (упругость, однородность, направление волокон), конструктивных особенностей технологического инструмента и возможностей гибочного пресса.

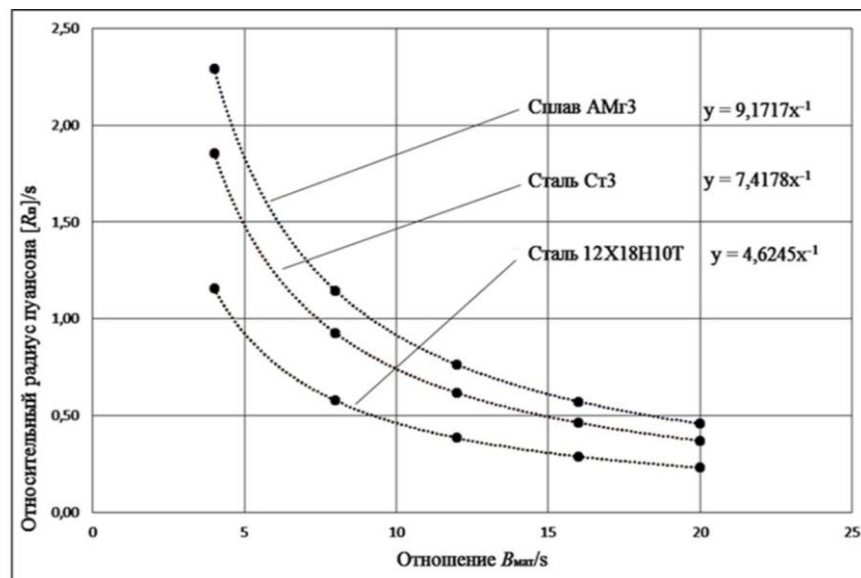


Рисунок 2.20 – Зависимость относительного значения допускаемого радиуса пуансона $[R_{\text{п}}]/s$ от относительного расстояния между рабочими кромками (ширины паза) матрицы $B_{\text{мат}}/s$

Выводы по главе 2

1. Рассмотрены вопросы изготовления тонкостенных корпусов небольших устройств мелкосерийного или единичного производства с использованием ступенчатой воздушной гибки, в которой используется множество последовательных V-образных изгибов для получения требуемого радиуса заготовки. Дана формула для определения размера шага (длины) ступени, который равен расстоянию между двумя последовательными изгибами, и представляет собой расстояние, на которое необходимо передвигать листовой материал после каждой ступени гибки.

2. На основе анализа процесса ступенчатой гибки листового материала получены зависимости для угла гибки, соответствующего одной ступени, и абсолютного отклонения реального (многогранного) наружного профиля листового материала при ступенчатой гибки от заданного профиля в виде окружности. Для удобства практического использования выражение для отклонения профиля представлено в безразмерном виде; приведены зависимости относительного и абсолютного отклонения многогранного профиля от количества ступеней при угле гибки 90° и радиусе гибки 100 мм.

3. В результате математической обработки полученных данных установлено, что зависимости относительного отклонения δR многогранного профиля от количества ступеней $Z_{\text{ступ}}$ и от угла гибки $\alpha_{\text{ступ}}$, соответствующий одной ступени, очень хорошо описываются степенными функциями:

$$\delta R \cong 0,3 / Z_{\text{ступ}}^2; \quad \delta R \cong 0,0002 \cdot \alpha_{\text{ступ}}^2.$$

Показано, что для обеспечения допуска размера h12 необходимо не менее $Z_{\text{ступ}}=10$ ступеней гибки, для h14 – достаточно $Z_{\text{ступ}}=6$.

4. Получена зависимость угла гибки $\alpha_{\text{ступ}}$, соответствующего одной ступени, от отношения хода пуансона к ширине паза матрицы $H_{\text{п}}/B_{\text{мат}}$ при свободной (воздушной) гибке. Установлено, что зависимость отношения хода пуансона к ширине паза матрицы $H_{\text{п}}/B_{\text{мат}}$ от количества ступеней можно описать линейной значимостью. Для удобства практического использования выражение

для хода пуансона целесообразно представлено в безразмерном виде путем введения относительных значений ширины паза матрицы $B_{\text{мат}}^* = B_{\text{мат}}/s$ и хода пуансона $H_{\text{п}}^* = H_{\text{п}}/s$. С учетом этих выражений получена зависимость относительного хода пуансона $H_{\text{п}}/s$ от количества ступеней (шагов) гибки $Z_{\text{ступ}}$ при полном угле гибки $\alpha_{\text{гиб}} = 90^\circ$ для часто применяемых отношений паза матрицы к толщине листового материала $B_{\text{мат}}/s$: 4, 8, 12, 16, 20. Расчеты показали, что зависимость относительного хода пуансона $H_{\text{п}}/s$ от количества ступеней (шагов) гибки $Z_{\text{ступ}}$ носит линейный характер, при этом с увеличением отношения паза матрицы к толщине листового материала $B_{\text{мат}}/s$ растет ход пуансона (глубине проникновения пуансона в матрицу).

5. Предложена методика определения радиуса пуансона при воздушной гибке тонколистового металла, применение которой исключает смятие контактной поверхности изгибаемого листового материала. Чтобы избежать повреждения пуансоном поверхности металлического листа необходимо, чтобы максимальные контактные напряжения $\sigma_{\text{кон}}$, которые возникают при воздействии пуансона на деформируемый листовой материал, не превышали допускаемого напряжения смятия $[\sigma_{\text{см}}]$. Допускаемое напряжения смятия $[\sigma_{\text{см}}]$, определяли по формуле через предел текучести и временное сопротивление деформируемого материала. Для определения максимальных контактных напряжений $\sigma_{\text{кон}}$ в случае упругого контакта цилиндра с плоскостью, который характерен для начальной стадии воздушной гибки, применен подход Герца-Беляева, а для усилия деформирования использована известная из теории листовой штамповки формула. Получено выражение для определения допускаемого радиуса пуансона, т.е. минимальное значение радиуса, при котором не происходит смятие поверхности деформируемого металла. В результате расчетов получены зависимости допускаемого радиуса пуансона $[R_{\text{п}}]$ от толщины листового материала и расстояния между рабочими кромками (ширины паза) матрицы.

ГЛАВА 3. ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА СТУПЕНЧАТОЙ ГИБКИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ

3.1 Технологические факторы лазерного упрочнения

Одним из наиболее эффективных и перспективных направлений повышения эксплуатационной стойкости технологического инструмента для обработки металлов давлением является лазерное поверхностное упрочнение, широкое промышленное применение которого стало возможным с развитием и внедрением высокомошных промышленных лазеров [61-63]. При лазерной термообработке нагрев металла происходит с внешней поверхности за счёт сфокусированного луча высокой энергоёмкости. Это исключает необходимость применения охлаждающих сред и значительно упрощает технологический процесс упрочнения [64-67]. Лазерное воздействие характеризуется крайне малой продолжительностью теплового импульса, что обеспечивает минимальные деформации обрабатываемых деталей и высокую точность геометрии. Путём регулирования параметров лазерного излучения и режимов обработки можно в широком диапазоне управлять скоростями нагрева и охлаждения, а также длительностью воздействия, обеспечивая формирование требуемой микроструктуры и механических свойств материала в зоне термического влияния [68-70].

В зависимости от требований, предъявляемых к размеру упрочненного слоя и технико-экономическим показателям процесса лазерной термической обработки, применяют лазеры непрерывного или импульсного излучения. На практике для лазерной закалки рабочего инструмента в различных процессах обработки металлов давлением (ОМД) часто используют СО₂-лазеры, которые обеспечивают непрерывный поток лазерного излучения и имеют хорошие эксплуатационные показатели. При анализе процессов лазерной обработки необходимо учитывать две группы параметров [61–63, 71-72], которые представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные параметры лазерного излучения (группа А), и теплофизические характеристики обрабатываемого материала (группа Б), определяющие качество процесса непрерывной лазерной термообработки

№	Наименование	Обозначение	Единица измерения	Размерность в системе СИ
Группа А. Параметры процесса непрерывной лазерной обработки				
1	Мощность	P	Вт	$[\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}]$
2	Плотность мощности	q	Вт/мм ²	$[\text{кг} \cdot \text{с}^{-3}]$
3	Скорость перемещения лазерного луча	V	мм/с	$[\text{м} \cdot \text{с}^{-1}]$
4	Диаметр лазерного пятна	$d_{\text{п}}$	мм	$[\text{м}]$
5	Расстояние (шаг) между соседними лазерными дорожками	S	мм	$[\text{м}]$
6	Коэффициент поглощения лазерного излучения покрытием	$K_{\text{пог}}$	-	-
Группа Б. Теплофизические характеристики обрабатываемого материала				
1	Коэффициент теплопроводности	λ	Вт/мм	$[\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}]$
2	Коэффициент температуропроводности	α	мм ² /с	$[\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}]$
3	Температура плавления	$T_{\text{пл}}$	°С	$[\text{К}]$
4	Температура закалки	$T_{\text{зак}}$	°С	$[\text{К}]$

При вычислении плотности лазерного излучения обычно считается, что лазерное излучение равномерно распределено по площади лазерного пучка $A = \pi \cdot (d_{\text{п}})^2 / 4$, и поэтому формула имеет следующий вид

$$q = \frac{P}{A} = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot d_{\text{п}}^2}.$$

При лазерной закалке пуансонов и матриц листогибочных прессов плотность лазерного излучения q обычно лежит в пределах от 10 до 1000 Вт/мм².

Ввиду нелинейного характера протекающих тепловых процессов построение адекватных теоретических моделей лазерной термообработки металлов с использованием классической теории теплопроводности затруднено, и поэтому на практике широко применяются численные методы, анализ размерностей и т.д. Во многих исследованиях лазерной термообработки применяют математические модели, полученные статистической обработкой экспериментальных данных.

В рамках теории размерностей, центральным положением которой является так π-теорема Бекингема (E.Buckingham), любое физико-математическое выражение может быть сведено к безразмерному критериальному уравнению [73 - 75], включающему размерности основных физических величин, в качестве которых в системе СИ используется: метр (м) - в качестве единицы длины; секунда (с) - в качестве единицы времени; килограмм (кг) - в качестве единицы массы; Кельвин (К) - в качестве единицы температуры.

В работах [72, 85, 94, 103] показано, что на толщину лазерно-упрочненного слоя $h_{\text{зак}}$ и поверхностную температуру $T_{\text{пов}}$ оказывают влияние теплофизических свойств материала обрабатываемого металла и параметры лазерной обработки, что выражается функциональными зависимостями:

$$h_{\text{зак}} = f_1(\lambda, \alpha, q, t, T_{\text{пл}}, T_{\text{зак}}) \quad (3.1)$$

$$T_{\text{пов}} = f_1(\lambda, \alpha, q, t) \quad (3.2)$$

Согласно π -теореме, данные зависимости могут быть преобразованы в безразмерные критериальные уравнения:

$$h_{\text{зак}} = C_1 \cdot \sqrt{a \cdot t} \cdot \left(\frac{q_{\text{пл}} \cdot \sqrt{a \cdot t}}{\lambda \cdot T_{\text{пл}}} \right)^g \cdot \left(\frac{T_{\text{зак}}}{T_{\text{пл}}} \right)^n \quad (3.3)$$

$$T_{\text{пов}} = T_{\text{пл}} = C_2 \cdot \left(\frac{T_{\text{пл}}}{\lambda} \right) \cdot \sqrt{a \cdot t} \quad (3.4)$$

где C_1, C_2, g, n – эмпирические константы, значения которых определяются на основе экспериментальных исследований, указанные в таблице 3.1

В соответствии с методом Рэлея [73 - 75] наибольшая толщина лазерно-упрочненного слоя может быть записана следующим образом

$$h_{\text{зак}} = C_1 \cdot \lambda^e \cdot \alpha^f \cdot q^g \cdot t^h \cdot T_{\text{пл}}^m \cdot T_{\text{зак}}^n \quad (3.5)$$

Размерности величин, использованных в этой формуле, приведены в таблице 3.1, и после их подстановки в (3.5) получим следующее соотношение

$$[M] = C_1 \cdot [\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}]^e \cdot [\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}]^f \cdot [\text{кг} \cdot \text{с}^{-2}]^g \cdot [\text{с}]^h \cdot [\text{К}]^m \cdot [\text{К}]^n,$$

что после преобразований может быть записано в виде:

$$[M] = C_1 \cdot [\text{кг}]^{e+g} \cdot [\text{м}]^{e+2 \cdot f} \cdot [\text{с}]^{-3 \cdot e - f - 3 \cdot g + h} \cdot [\text{К}]^{-e+m+n}.$$

Из этой формулы видно, что показатели степеней можно определить из следующих зависимостей:

$$\begin{aligned} e + g &= 0 \\ e + 2 \cdot f &= 16 \\ -3 \cdot e - f - 3 \cdot g + h &= 0 \\ -e + m + n &= 0. \end{aligned} \quad (3.6)$$

После подстановки найденных значений коэффициентов в исходное выражение (3.5) формула для вычисления максимальной глубины закалки принимает вид:

$$h_{\text{зак}} = C_3 \cdot \left(\frac{\lambda \cdot T_{\text{пл}}}{q_{\text{пл}}} \right) \cdot \left(\frac{T_{\text{зак}}}{T_{\text{пл}}} \right)^n = C_3 \cdot \sqrt{a \cdot t} \cdot \left(\frac{T_{\text{зак}}}{T_{\text{пл}}} \right)^n \quad (3.7)$$

Анализ полученного выражения, аналогичного зависимости (3.3), показывает, что основными параметрами, которые влияют на максимальную глубину закалки $h_{\text{зак}}$ являются время воздействия t и плотность мощности лазерного излучения q . Поскольку отношение температуры закалки к температуре плавления для конкретного материала величина постоянная, то в формуле (3.7) можно принять $n = 1$ и она принимает более простой вид:

$$h_{\text{зак}} = C_4 \cdot \left(\frac{\lambda \cdot T_{\text{зак}}}{q_{\text{пл}}} \right) = C_4 \cdot \sqrt{a \cdot t} \cdot \left(\frac{T_{\text{зак}}}{T_{\text{пл}}} \right) \quad (3.8)$$

Таким образом, толщина лазерно-упрочненного слоя $h_{\text{зак}}$ зависит от температур закалки и плавления обрабатываемого металла, а также от его температуропроводности и времени воздействия лазерного излучения. Сравнение теоретических зависимостей с экспериментальными данными [76] подтверждает достоверность установленных закономерностей (рисунок 3.1). При лазерном термоупрочнении образцов из стали 12Х18Н10 плотность мощности лазерного излучения изменяли в диапазоне 25-125 Вт/мм², а скорость перемещения лазерного пятна диаметром 3 мм – от 10 до 35 мм/с.

В большинстве разработок, связанных с исследованием процессов лазерного термоупрочнения технологического инструмента ОМД, параметры лазерной обработки, как правило, задаются в абсолютном виде, что ограничивает применение полученных результатов только для анализируемых материалов и конкретных условий проведения исследовательских работ. В некоторых случаях авторы применяют безразмерные (относительные) параметры лазерной обработки, но делают это без какого-либо обоснования. В связи с этим представляет

значительный научный и практический интерес использование методологии теории размерностей и подобия, согласно которой для описания процессов взаимодействия лазерного излучения с металлическими поверхностями целесообразно применять обобщенные (безразмерные) комплексы, имеющие прозрачный физический смысл. Примерами могут служить теоретические и экспериментальные исследования в области механики сплошных сред.

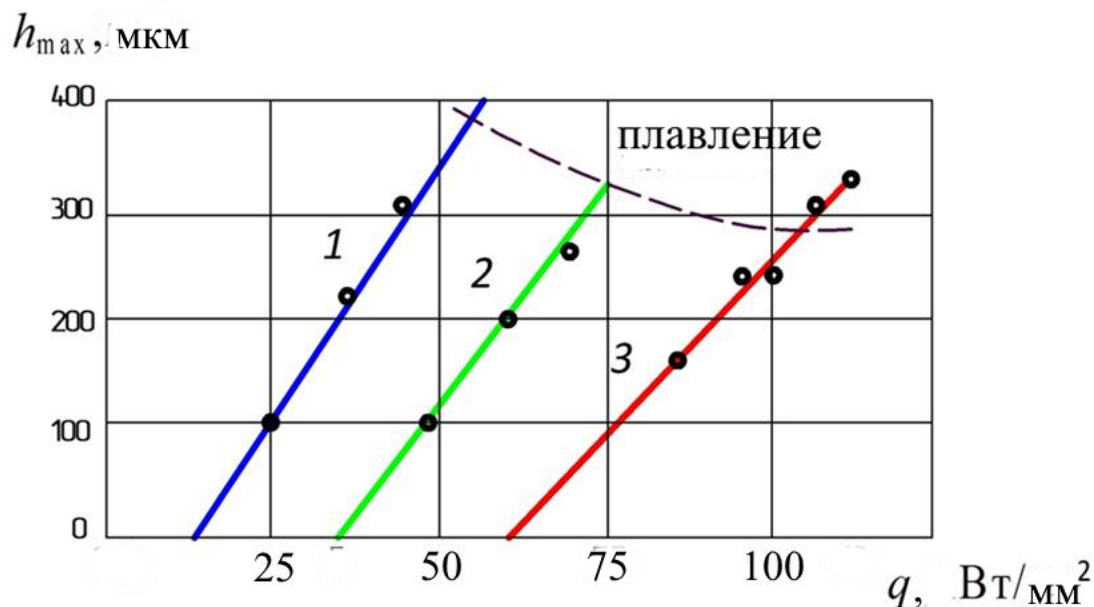


Рисунок 3.1 – Экспериментальные данные по величине максимальной глубины лазерно-закаленного слоя $h_{\text{зак}}$ нержавеющей стали 12Х18Н10 [76]; цифрами обозначены данные для скорости перемещения лазерного пятна $V = 11 \text{ мм/с}$ (1); $V = 25 \text{ мм/с}$ (2); $V = 33 \text{ мм/с}$ (3)

В рамках проведённого исследования (см. раздел 3.5), используя фундаментальные положения теории размерностей, предложены относительные (безразмерные) комплексы, с помощью которых осуществлено обобщенное представление процессов термической обработки различных сталей с помощью лазерного излучения. В отличие от известных аналогов, представленных в научно-технической литературе, предложенные комплексы одновременно учитывают технологические характеристики лазерной обработки и теплофизические свойства обрабатываемого материала, что придаёт им отчётливо выраженный физический

смысл и повышает универсальность их использования. Введение таких параметров позволяет разрабатывать математические модели процессов лазерной закалки, а также проводить оптимизацию режимов термообработки и смежных технологических операций.

Использование указанных безразмерных критериев создает основу для построения математических моделей, описывающих процесс лазерной закалки, что, в свою очередь, позволяет выполнять разработку и оптимизацию технологических параметров лазерной термообработки и смежных технологических процессов.

3.2 Исследование структуры слоя, подвергнутого лазерной закалке

В работах [77-78] показано, что в лазерно-упрочненной области при закалке углеродистых и легированных инструментальных сталей без оплавления поверхности формируются два слоя, различающихся по типу протекающих фазовых превращений.

В первом слое происходит полная и неполная закалка из твердой фазы при температуре выше критической точке A_{c1} . В области у его поверхности формируется структура, состоящая из мартенсита и остаточного аустенита, возникающего при охлаждении из гомогенного аустенита.

Второй слой представляет собой переходную область, которая образуется при более низких температурах (ниже A_{c1}).

При исследовании образцов из материала инструмента, подвергнутого поверхностной обработке пучком лазера по определенной технологии (углеродистая (У8) и легированные (40ХН2МА, 5ХВ2С, 9ХС и Х12М) марки сталей) обнаружены мартенсит, аустенит (остатки) и карбидные включения [63, 79]. При этом мартенсит, формирующийся при лазерной закалке, отличается более высокой дисперсностью по сравнению с традиционной объёмной закалкой. При этом с увеличением содержания углерода и легирующих элементов доля остаточного аустенита возрастает. После лазерной обработки её значение

оказывается в 1,5–2,5 раза выше, чем при объемной закалке, что объясняется недостаточной продолжительностью диффузионных процессов, препятствующих выравниванию состава аустенита в условиях кратковременного лазерного нагрева. Размер карбидов в исследованных сталях составляет порядка 0,26–0,30 мкм.

В нашей работе [104] приведены результаты исследования, в которых для оценки влияния содержания углерода и легирующих элементов на глубину и твердость закаленного слоя лазерной обработке подвергали образцы из сталей У8, 9ХС, Х12М и 40ХН2МА по следующему режиму: мощность излучения $P = 1,25$ кВт, скорость обработки $V = 5$ мм/с, диаметр лазерного пятна $d_{\text{л}} = 7$ мм, поглощающее покрытие – МЦС-510. Экспериментальные данные показали, что глубина и твердость закалённого слоя различаются в зависимости от структурного типа стали (рисунок 3.2).

Наибольшие значения этих параметров зафиксированы для эвтектоидной стали У8 и заэвтектоидной 9ХС, а наименьшие — для доэвтектоидной 40ХН2МА и ледебуритной Х12М. Различия объясняются различными температурами закалки указанных групп сталей: для доэвтектоидных — 850...870 °С, для ледебуритных — 1050...1200 °С. Поскольку при лазерной закалке нагревается сравнительно тонкий поверхностный слой, фазовые превращения в объеме металла протекают не полностью. Эвтектоидные и заэвтектоидные стали имеют более низкие температуры закалки (760...850 °С), при этом у заэвтектоидных сталей часть тепловой энергии расходуется на растворение карбидов — центров распада аустенита, что снижает их прокаливаемость.

Также установлено, что легированные инструментальные стали имеют большую прокаливаемость по сравнению с углеродистыми при лазерной обработке поверхности. Это связано, прежде всего, с их пониженной теплопроводностью, вследствие чего прогрев до температур закалки происходит на большую глубину.

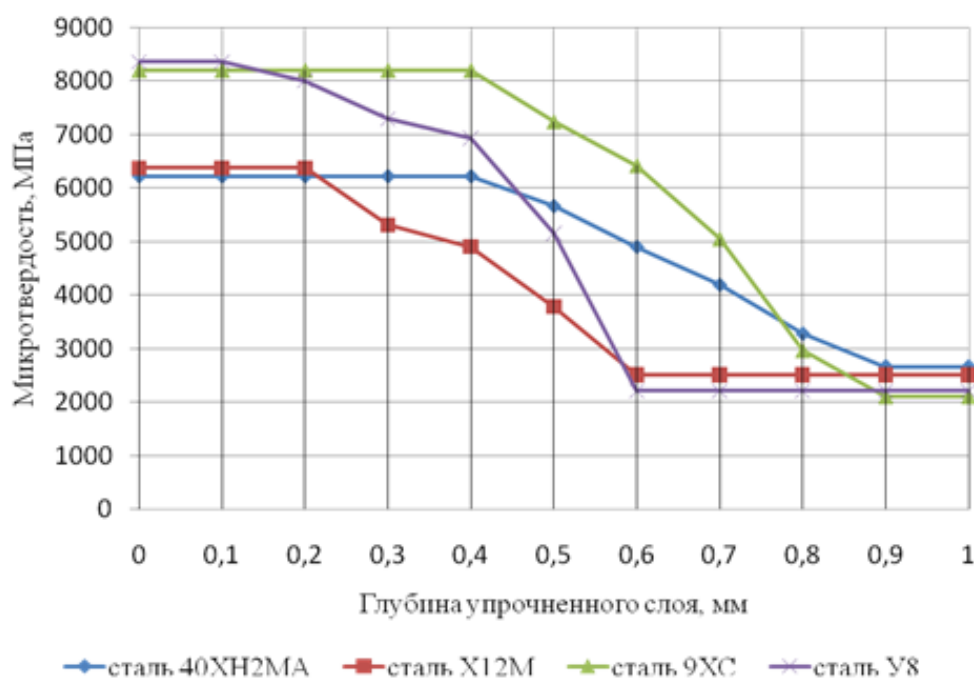


Рисунок 3.2 – Распределение НВ по глубине лазерно-упрочненного слоя для различных сталей [104]

При этом высокая скорость охлаждения (10^5 – 10^6 °C/c) снижает влияние критической скорости заковки на формирование структуры, что требует пересмотра подходов к выбору легирующих добавок для сталей, предназначенных для лазерного упрочнения. В результате анализа экспериментальных данных установлено [104], что толщина первого слоя лазерно-упрочненной области зависит от теплофизических свойств стали, при этом чем больше коэффициент теплопроводности λ , тем меньше толщина закаленного слоя (рисунок 3.3).

Поэтому при лазерном термоупрочнении рекомендуется использовать стали в которых содержатся легирующие элементы, способствующие уменьшению теплопроводности. Например, превышение Si свыше 1 % значительно снижает коэффициент теплопроводности стали, что несомненно потребует применение повышенного содержания Si для увеличения зоны закаленного слоя, что наглядно видно на рисунке 3.3. При сопоставимом содержании углерода сталь 9XC демонстрирует большую глубину упрочнённого слоя по сравнению с У8, что связано с более высоким содержанием Si.

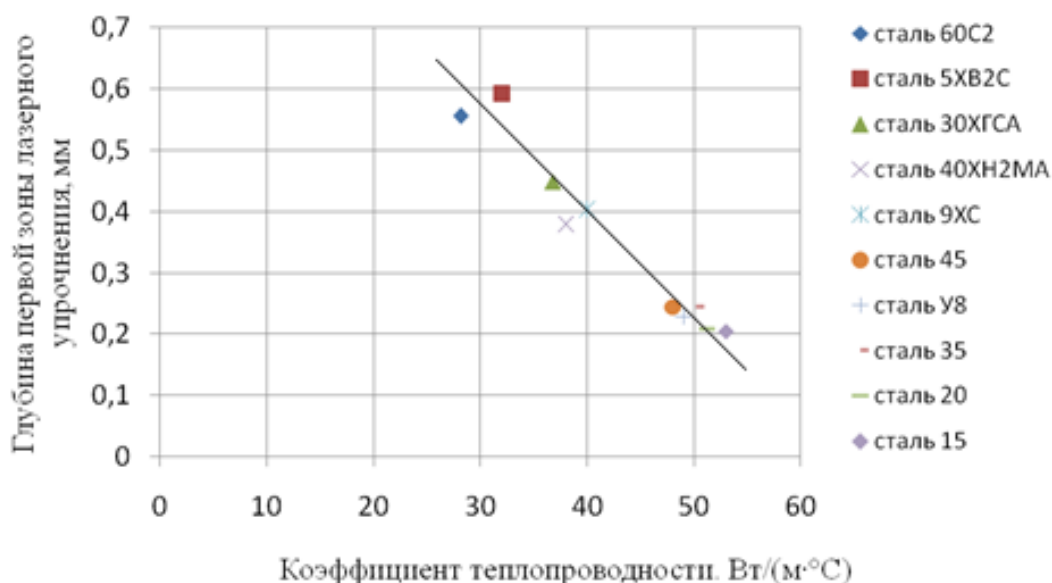


Рисунок 3.3 – Изменение толщины первого слоя лазерно-упрочненной области для различных марок стали [104]

3.3 Анализ математических моделей глубины зоны лазерной закалки

Глубина $h_{\text{зак}}$ лазерно-закаленной зоны является одним из основных показателей качества технологического инструмента в процессах обработки металлов давлением (ОМД). От величины этого параметра напрямую зависят такие эксплуатационные характеристики пуансонов и матриц листогибочных прессов как износостойкость, долговечность и устойчивость к циклическим нагрузкам.

В результате анализа известных из научно-технической литературы экспериментальных исследований, в которых рассматривается влияние режимов лазерной термообработки углеродистых и легированных сталей на глубину лазерно-закаленной зоны, установлено, что сопоставление этих данных представляет определённые трудности, поскольку исследования выполнены в различных условиях, а используемые авторами методики и режимы обработки зачастую не унифицированы. В результате полученные зависимости нередко носят частный характер, а количественные результаты — противоречивы и ограниченно воспроизводимы.

Так, в работе [80] после математической обработки экспериментальных данных рекомендовано использовать формулу:

$$h_{\text{зак}} = 0,336 + 0,625 \cdot P - 0,314 \cdot \lg V + 0,083 \cdot (\lg V)^2 - 0,159 \cdot d_{\text{п}} - 0,340 \cdot P \cdot \lg V + 0,073 \cdot P \cdot d_{\text{п}} \quad (3.9)$$

Расчеты по приведенной формуле показали, что полученные значения глубины $h_{\text{зак}}$ закаленного слоя для данной марки стали совпадают с опытными величинами с погрешностью не более 7 %. Однако её применение для других марок стали не дало положительных результатов.

Авторами работы [81] по результатам обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получено более универсальное выражение для вычисления глубины закали $h_{\text{зак}}$, в котором использованы обобщенные теплотехнические параметры:

$$h_{\text{зак}} = -0,11 + 3,02 \cdot \frac{P}{\sqrt{d_{\text{п}} \cdot V}} \quad (3.10)$$

Основное преимущество приведенной зависимости заключается в том, что при определении значения глубины $h_{\text{зак}}$ закаленного слоя используются все характеристики лазерной обработки: мощность лазерного излучения, скорость перемещения лазерного луча и диаметр лазерного пятна на поверхности детали. Однако её применение на практике показало, что результаты расчетов плохо согласуются с экспериментальными данными.

Для ориентировочного вычисления значения глубины $h_{\text{зак}}$ закаленного слоя в работе [81] предложена следующая зависимость, которая получена для одномерной задачи теплопроводности при воздействии на обрабатываемую поверхность импульсного излучения:

$$h_{\text{зак}} = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot \tau}{\pi} - \frac{T_{\text{зак}} \cdot \lambda}{q}}, \quad (3.11)$$

Кроме того, в работе [79] приведена формула, в которой при определении глубины $h_{\text{зак}}$ закаленного слоя, кроме температуры закалки $T_{\text{зак}}$, используется также температура плавления металла $T_{\text{пл}}$

$$h_{\text{зак}} = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot \tau}{\pi}} \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{зак}}}{T_{\text{пл}}} \right), \quad (3.12)$$

Приведенные достаточно простые выражения можно использовать для качественной оценки глубины $h_{\text{зак}}$ закаленного слоя, так как позволяют описать основные закономерности распределения температур и глубины термического влияния. Однако количественные результаты расчётов по приведённым выражениям нередко существенно расходятся с экспериментальными данными. Это связано с тем, что в реальных технологических условиях допущения, положенные в основу теоретических моделей (равномерное распределение потока, постоянство теплофизических свойств, отсутствие конвекции и др.), не выполняются в полной мере.

Таким образом, несмотря на простоту существующих аналитических зависимостей, для адекватного описания процессов лазерной закалки требуется использование уточнённых численных моделей, учитывающих реальное распределение плотности потока и изменение свойств материала при нагреве.

3.4 Математическое планирование эксперимента

Выше было показано, что известные из научно-технической литературы формулы для оценки глубины $h_{\text{зак}}$ лазерно-закаленной зоны часто плохо соответствуют результатам экспериментальных исследований по лазерному термоупрочнению углеродистых и легированных инструментальных сталей, которые используются при изготовлении технологического инструмента ступенчатой гибки тонколистовой стали. Поэтому возникла необходимость разработка математической модели, которая лучше описывает взаимодействие лазерного излучения с обрабатываемым материалом.

В наших исследованиях для построения математической модели глубины $h_{\text{зак}}$ лазерно-закаленного слоя использовали экспериментальные данные по лазерному термоупрочнению образцов из стали У8. В работах [72, 85, 94, 103] показано, что на толщину лазерно-упрочненного слоя $h_{\text{зак}}$ основное влияние оказывают такие параметры лазерной обработки как мощность лазера (P), при обработке им поверхности с определенной скоростью (V), значения которых изменяли в следующих пределах: $P = 1,3 \dots 2,7$ кВт; $V = 10 \dots 40$ мм/с. Диаметр лазерного пятна в процессе проведения данной серии экспериментов не изменялся и принимался равным $d_{\text{л}} = 4$ мм.

Проведение экспериментов и обработку опытных данных проводили методом математического планирования эксперимента [82 – 84], при реализации которого использовали безразмерные (кодированные) значения факторов:

$$X_1 = \frac{P - P_0}{\Delta P}, \quad X_2 = \frac{V - V_0}{\Delta V}, \quad (3.13)$$

При проведении экспериментальных исследований центральное значение мощности принимали равным $P_0 = 2000$ Вт и расстояние между соседними точками плана $\Delta P = 700$ Вт, соответственно центральное значение скорости принимали равным $V_0 = 1,5$ м/мин и расстояние между соседними точками плана $\Delta V = 0,9$ м/мин.

Выбор третьей степени полинома, которому должна соответствовать нелинейная зависимость глубины $h_{\text{зак}}$ закаленного слоя (функция отклика) от выбранных факторов, был обоснован на основе результатов изучения использованных источников. Поэтому, в соответствии с рекомендациями по математическому планированию экспериментов [86-87], для построения математической модели глубины $h_{\text{зак}}$ лазерно-закаленного слоя применили ортогональный композиционный план третьего порядка, содержащий 20 точек. При этом для оценки точности опытных данных в каждой точке плана проводили 3 испытания, т.е. было проведено 60 опытов. Глубину $h_{\text{зак}}$ закаленного слоя

измеряли с помощью инструментального микроскопа на микрошлифах вырезанных образцов.

После проведения стандартных процедур метода математического планирования эксперимента для углеродистой инструментальной стали У8 предложена нелинейная зависимость глубины $h_{\text{зак}}$ закаленного слоя (функции отклика).

$$h_{\text{зак}} = (-0219 + 0,007 \cdot V - 0,000089 \cdot V^2) + (1 - 0,046 \cdot V + 0,00063 \cdot V^2) \cdot P, \quad (3.14)$$

где $h_{\text{зак}}$ в мм, V в мм/с, P в кВт.

Строго говоря, полученное выражение справедливо только для рассматриваемой марки стали. В то же время, на её основе можно вывести более универсальную зависимость, которая может использоваться для оценки глубины $h_{\text{зак}}$ закаленного слоя других марок углеродистых и даже легированных инструментальных марок стали, если вместо натуральных значений параметров ввести следующие безразмерные (обобщенные) факторы с использованием теплофизических характеристик стали:

- относительная толщина лазерно-упрочненного слоя

$$\hat{h}_{\text{зак}} = \frac{h_{\text{зак}}}{h_0}; \quad (3.15)$$

- обобщенная характеристика лазерной обработки

$$\kappa = \frac{P^*}{\sqrt{V^*}}. \quad (3.16)$$

Параметр h_0 – это максимально возможное теоретическое значение закаленного слоя, которое соответствует температуре плавления металла.

Относительные значения мощности поглощаемого лазерного излучения P^* и скорости движения лазерного пятна по обрабатываемой поверхности приведены ниже в разделе 3.5 – формулы (3.19) - (3.20).

После подстановки в приведенные выше выражения теплофизических характеристик стали У8 (α , λ и $T_{пл}$) формула для определения относительной глубины $\hat{h}_{зак}$ закаленного слоя принимает следующий вид:

$$\hat{h}_{зак} = -0,055 + 0,248 \cdot \kappa. \quad (3.17)$$

Поскольку в полученную зависимость входят безразмерные (обобщенные) факторы лазерного излучения (скорости V^* и мощности P^*) и теплофизические характеристики стали (температура плавления, коэффициенты температуропроводности и теплопроводности), то её можно применить для определения глубины $h_{зак}$ закаленного слоя других марок углеродистых и даже легированных инструментальных марок стали. В качестве примера на рисунке 3.5. приведены результаты обработки опытных данных, полученных на образцах из сталей У10, 9ХС, Х12М, 40ХН2МА при их обработке лазером. Видно, что опытные данные хорошо согласуются с полученным выражением, в котором использованы безразмерные (обобщенные) факторы.

Сопоставление предложенной зависимости с результатами, полученными другими исследователями, а также с экспериментальными данными по лазерной закалке сталей У10, 9ХС, Х12М и 40ХН2МА, показало хорошее согласование и подтверждает универсальность модели (рисунок 3.4).

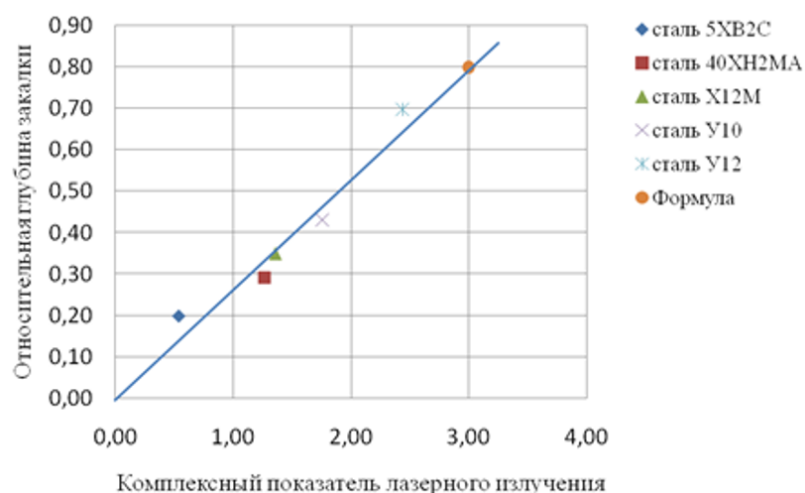


Рисунок 3.4 – Сравнение рассчитанных по формуле (3.17) значений относительной толщины лазерно-закаленного слоя с опытными данными

3.5 Лазерная закалка технологического инструмента для обработки металлов давлением

Эффективность процессов обработки металлов давлением (ОМД), а также качество получаемых изделий во многом зависят от эксплуатационной стойкости и надежности технологического инструмента. В связи с этим обеспечение требуемой долговечности пуансонов, матриц и других элементов оснастки является одной из ключевых задач современного машиностроения и металлургии [88 – 90].

Особая актуальность данной проблемы в последние годы обусловлена ограничением поставок высокотехнологичного оборудования и технологий из-за санкционной политики ряда западных стран. В результате отечественные металлургические и машиностроительные предприятия активно реализуют программы модернизации и реинжиниринга существующих агрегатов, направленные на повышение их надежности и ресурса, а также на улучшение качества конечной продукции [91 – 93].

Повышение износостойкости и ресурса технологического инструмента ОМД традиционно достигается путем оптимального подбора марки стали и рационального выбора режимов термической обработки. На практике применяются различные методы упрочнения: объемная закалка, химико-термическая и ионно-плазменная обработка, нанесение твердых покрытий, а также поверхностное модифицирование с использованием концентрированных потоков энергии. В последние десятилетия особое развитие получила лазерная термообработка, позволяющая значительно увеличить эксплуатационную стойкость рабочих поверхностей инструмента при минимальной деформации изделия [65 – 70].

Высокая эффективность лазерного упрочнения обеспечивается за счет короткого времени теплового воздействия и возможности гибкого управления параметрами излучения. Управляя ими, можно регулировать скорость нагрева и охлаждения материала, а также формировать заданные структуры и физико-механические свойства в поверхностном слое металла.

В технологической практике для термического упрочнения применяются лазеры как непрерывного, так и импульсного действия. Выбор типа излучателя определяется необходимой глубиной модифицированного слоя и требуемой производительностью процесса. В промышленных условиях для упрочнения инструментов ОМД наибольшее распространение получили СО₂-лазеры непрерывного действия, обладающие высокой мощностью и стабильностью выходного излучения. Они обеспечивают значительную глубину зоны лазерного влияния при высокой производительности и хорошем контроле процесса термоупрочнения.

При лазерной термообработке возможно проведение нагрева как с оплавлением поверхности, так и без него. В рамках настоящей работы рассмотрен процесс лазерной закалки без оплавления поверхности, реализуемый с использованием СО₂-лазеров непрерывного действия — как наиболее характерный и технологически оправданный вариант при термоупрочнении штампов холодного деформирования.

Наиболее интенсивные изменения температуры наблюдаются в поверхностном слое, подвергающемся прямому воздействию излучения; с увеличением глубины амплитуда температурных колебаний уменьшается, а распределение становится более плавным.

Экспериментальные исследования проводились на образцах из стали 40ХН2МА, применяемой для изготовления вырубных штампов и валков холодной прокатки, с целью установления зависимости глубины закаленного слоя от параметров обработки при отсутствии нарушения поверхностного слоя образцов.

Проведение экспериментов и обработку опытных данных проводили методом математического планирования эксперимента [82 – 84], а обобщение результатов осуществлялось с использованием относительных (безразмерных) параметров [94, 103]:

1) шаг соседних лазерных дорожек

$$s^* = \frac{s}{d_{\Pi}}, \quad (3.18)$$

2) мощность поглощаемого лазерного излучения

$$P^* = \frac{2 \cdot K_{\text{пог}} \cdot P}{d_{\Pi} \cdot \lambda \cdot T_{\text{пл}}}, \quad (3.19)$$

3) скорость движения лазерного пятна

$$V^* = \frac{V \cdot d_{\Pi}}{4 \cdot a}, \quad (3.20)$$

4) толщина лазерно-закаленного слоя

$$h_{\text{зак}}^* = \frac{4 \cdot h_{\text{зак}} \cdot P}{\pi \cdot d_{\Pi}^2 \cdot (T_{\text{пл}} - T_{\text{зак}}) \cdot \lambda'}, \quad (3.21)$$

В отличие от параметров, встречающихся в литературе, приведенные относительные (безразмерные) параметры содержат не только значения характеристик лазерного излучения (P , V , d_{Π} , $K_{\text{изл}}$), но и теплофизические свойства обрабатываемого материала (a , λ , $T_{\text{пл}}$, $T_{\text{зак}}$). Кроме того, они имеют ясный физический смысл.

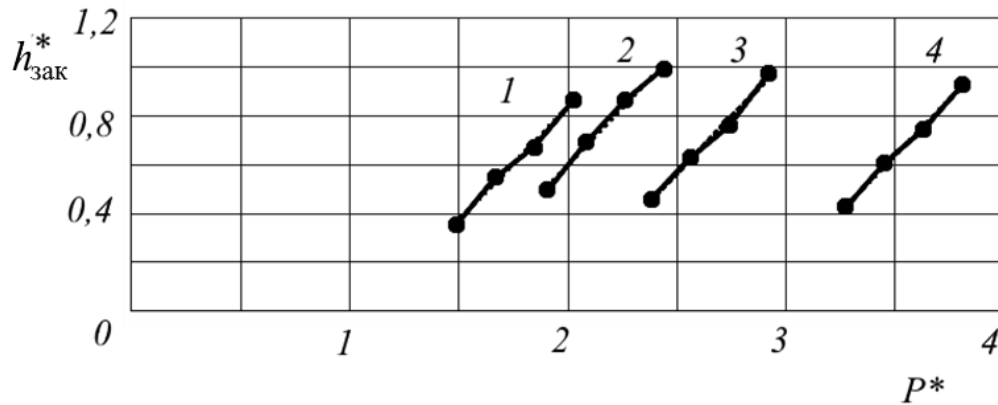
При практических расчетах допускается использование усредненных значений теплофизических коэффициентов λ и a , поскольку их изменение в диапазоне рабочих температур незначительно.

В качестве примера использования приведенных выше зависимостей рассмотрим экспериментальные данные [94], представленные в таблице 3.2 при лазерной обработке конструкционной легированной стали типа 40ХН2МА, которая применяется для производства валков станов холодной прокатки и вырубных штампов холодного деформирования [95–96].

Таблица 3.2 – Экспериментальные данные по толщине закаленного слоя при лазерной обработке инструмента из стали 40ХН2МА [94]

Параметры лазерной обработки				Толщина лазерно-закаленного слоя	
Скорость перемещения лазерного луча		Мощность лазерного излучения			
V , м/мин	V^*	P , Вт	P^*	$h_{\text{зак}}$, мм	$h_{\text{зак}}^*$
0,5	1,67	250	1,49	0,18	0,35
		280	1,67	0,24	0,55
		310	1,85	0,27	0,67
		340	2,02	0,32	0,86
1,0	3,33	320	1,90	0,19	0,50
		350	2,08	0,25	0,70
		380	2,26	0,28	0,87
		410	2,44	0,30	0,99
1,5	5,00	400	2,38	0,14	0,46
		430	2,56	0,18	0,63
		460	2,74	0,21	0,76
		490	2,92	0,25	0,97
2,0	6,67	550	3,27	0,10	0,43
		580	3,45	0,13	0,59
		610	3,63	0,14	0,70
		640	3,81	0,18	0,93

На основе экспериментальных данных, приведенных в таблице 3.2, построены зависимости $h_{\text{зак}}^*$ от P^* для различных скоростей лазерного перемещения V^* (рисунок 3.5). При проведении исследований диаметр лазерного пучка принят постоянным $d_{\text{л}} = 3$ мм, а коэффициент поглощения $K_{\text{пог}} = 0,3$ [94].



$$1 - V^* = 1,67; 2 - V^* = 3,33; 3 - V^* = 5,00; 4 - V^* = 6,67$$

Рисунок 3.5 – Изменение относительной толщины лазерно-закаленного слоя $h_{\text{зак}}^*$ для образцов из легированной стали 40XH2MA от относительных значений мощности P^* и скорости V^* [94]

Результаты аппроксимированы линейными уравнениями вида:

- при $V^* = 1,67$ ($V = 0,5$ м/мин) $\Rightarrow h_{\text{зак}}^* = 0,926 \cdot P^* - 1,017$;
- при $V^* = 3,33$ ($V = 1,0$ м/мин) $\Rightarrow h_{\text{зак}}^* = 0,929 \cdot P^* - 1,256$;
- при $V^* = 5,00$ ($V = 1,5$ м/мин) $\Rightarrow h_{\text{зак}}^* = 0,936 \cdot P^* - 1,775$;
- при $V^* = 6,67$ ($V = 2,0$ м/мин) $\Rightarrow h_{\text{зак}}^* = 0,922 \cdot P^* - 2,588$.

При коэффициенте аппроксимации $R^2 = 0,98-1,00$.

Обобщённая зависимость может быть представлена выражением:

$$h_{\text{зак}}^* \approx 0,933 \cdot P^* - P_0^*, \text{ при } P^* \geq P_0^*. \quad (3.13)$$

Величина P_0^* , соответствует пороговой относительной мощности, при которой поверхность ещё не достигает температуры закалки. Эта величина зависит от относительной скорости V^* и описывается следующей зависимостью

(рисунок 3.6), величина достоверной аппроксимации которой составляет $R^2=0,998$ [94]:

$$P_0^* = 1 - 0,345 \cdot V^* + 0,0368 \cdot (V^*)^2. \quad (3.14)$$

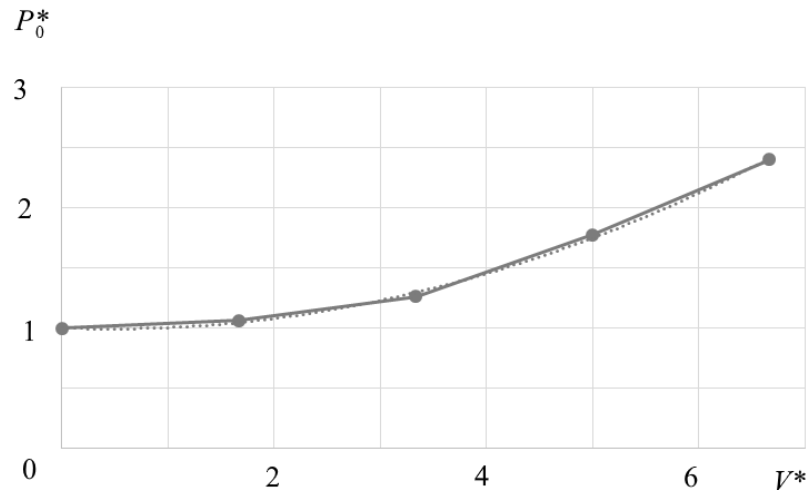


Рисунок 3.6 – Диаграмма для определения начальной относительной мощности поглощаемого лазерного излучения P_0^* при заданной относительной скорости движения лазерного пятна V^* [94]

Следует отметить, что полученные зависимости справедливы в пределах диапазонов параметров, использованных в эксперименте, однако благодаря применению безразмерных критериев они могут быть распространены и на другие инструментальные стали. Расхождение расчётных и экспериментальных данных при этом не превышает 7 %.

Для проверки универсальности модели проведено сопоставление с результатами лазерной обработки низколегированной стали AiSi4340 [97, 98] при скорости перемещения лазерного луча $V = 0,65$ м/мин, что соответствует $V^* = 2,17$. По формуле (3.14) вычислено пороговое значение относительной мощности лазерного излучения $P_0^* = 1,098$. равенство расчётных и экспериментальных значений относительной глубины заковки $(h_{\text{зак}}^*)_{\text{расч}}$ представлено в таблице 3.3 и подтверждает адекватность предложенной модели.

Таблица 3.3 – Сравнение значений глубины закаленного слоя от мощности лазерного излучения и скорости перемещения лазерного луча [94]

Экспериментальные значения величин						Расчетные значения	
размерные			безразмерные				
V , м/мин	P , Вт	$h_{\text{зак}}$ мм	V^*	P^*	$h_{\text{зак}}^*$	$(h_{\text{зак}}^*)_{\text{расч}}$	$h_{\text{зак}}^*$, %
0,65	298	0,226	2,17	1,77	0,541	0,557	-2,83
	353	0,287		2,10	0,814	0,862	-5,84
	369	0,334		2,20	0,991	0,951	4,02

Рассмотрено применение лазерной закалки без оплавления поверхности для повышения эксплуатационной стойкости технологического инструмента при обработке металлов давлением.

Экспериментальные данные приведены для конструкционной легированной стали типа 40ХН2МА. На их основе построены графические зависимости и выведены эмпирические формулы, связывающие относительную глубину закалки с относительными (безразмерными) параметрами лазерного излучения P^* (3.10) и V^* (3.11). В результате расчетов установлено, что полученные формулы (3.13) - (3.14) и построенные на их основе графики, представленные на рисунках (3.5) и (3.6), показали возможность их использования для оценки толщины лазерно-упрочненного слоя при лазерной обработке большинства углеродистых и легированных инструментальных сталей.

Это обеспечивает универсальность модели и возможность прогнозирования глубины закалки для различных инструментальных сталей, используемых в производстве штампов и других деталей технологического инструмента ОМД.

3.6 Экспериментальное исследование лазерной обработки стали X12M

Штамповочное производство широко используется в различных отраслях промышленности благодаря высокой производительности процессов пластического формоизменения, точности изделий и разнообразию выпускаемых деталей. Вместе с тем эффективность эксплуатации высокопроизводительного оборудования напрямую зависит от надежности технологического инструмента. Недостаточная эксплуатационная стойкость штампового инструмента приводит к увеличению затрат на замену и наладку изношенных деталей, снижению производительности прессового оборудования, увеличению доли брака и, как следствие, росту себестоимости продукции.

В условиях ограничений на импорт передовых технологий и современного оборудования особое значение приобретает реинжиниринг и модернизация эксплуатируемых машин и агрегатов, а также внедрение инновационных технологий, направленных на повышение надежности оборудования и качества продукции. Анализ причин выхода из строя штампового инструмента показал, что главным фактором, определяющим эксплуатационную долговечность пуансонов и матриц, является износ их рабочих поверхностей.

Для увеличения стойкости технологического инструмента на практике применяют различные виды термической и химико-термической обработки, позволяющие повысить его служебные свойства [77, 78, 99]. Одним из наиболее перспективных методов является лазерное поверхностное упрочнение, эффективность которого обеспечена развитием промышленных высокомошных лазеров [14 – 16]. Лазерная обработка обеспечивает, нагрев металла с поверхности за минимальное время воздействия, что практически исключает деформации обрабатываемых изделий.

В настоящем разделе представлены результаты экспериментального исследования лазерного поверхностного упрочнения образцов стали X12M [100], прошедших стандартную объемную закалку и отпуск с целью определения

толщины лазерно-упрочненного слоя в зависимости от скорости движения лазерного пятна по обрабатываемой поверхности и мощности лазерного излучения.

Поверхностное лазерное упрочнение предварялось подготовкой поверхности и нанесением желтой гуаши (поглощающего покрытия) толщиной 20 – 30 мкм, равномерно распределенная валиком, с последующей сушкой при комнатной температуре в течение 40–50 минут [103].

Лазерная обработка осуществлялась на установках с CO_2 -лазером, оснащенным маломощным гелий-неоновым лазером для контроля положения лазерного пятна и оптической системой, обеспечивающей точное совпадение траектории маломощного и мощного лазерного луча. Фокусировка и регулировка формы пятна выполнялись с помощью оптической линзы. Образцы или инструмент фиксировались на координатном столе с трехкоординатным поступательным перемещением, задаваемым с требуемой скоростью относительно лазерного луча.

Анализ закаленного слоя обработанного лазером инструмента проводили с помощью сертифицированных и аттестованных лабораторных приборов:

- микроскоп «Неофот-21» (от $\times 50$ до $\times 2000$);
- микротвердомер ПМТ-3.

Поскольку построение адекватных теоретических моделей с использованием классической теории теплопроводности затруднено, во многих исследованиях лазерной термообработки применяют математические модели, полученные статистической обработкой экспериментальных данных. Основной недостаток известных зависимостей заключается в том, что в них применяются абсолютные значения входящих в них величин, а также в плохом использовании теплофизических характеристик обрабатываемых материалов. Поэтому использование предложенных в разделе 3.5. безразмерных (обобщённых) параметров (3.9) - (3.12) позволяет более правильно описывать процессы лазерной обработки и прогнозировать характеристики закаленного слоя [73, 74, 101].

Математическая модель толщины $h_{\text{зак}}$ лазерно-закаленного слоя позволяет прогнозировать глубину закалки в зависимости от параметров лазерной обработки

и определить оптимальные режимы. С этой целью при математическом планировании экспериментов необходимо выбрать целевую функцию и влияющие на неё факторы (параметры). Экстремальные значения отклика целевой функции служат для выбора оптимальных значений факторов.

При выборе целевой функции необходимо выполнить ряд условий, основными из которых являются следующие: она должна иметь простой и ясный физический смысл, быть однозначной и единственной, могла быть оценена количественно [102, 103].

Глубина $h_{\text{зак}}$ лазерно-закаленной зоны является одним из основных показателей качества технологического инструмента в процессах обработки металлов давлением (ОМД). От величины этого параметра напрямую зависят такие эксплуатационные характеристики пуансонов и матриц листогибочных прессов как износостойкость, долговечность и устойчивость к циклическим нагрузкам.

В разделе 3.1 показано, что при анализе процессов лазерной обработки необходимо учитывать две группы параметров [61 – 63] (таблица 3.1).

Значения параметров определяли на основании экспериментальных исследований, проведенных на образцах из стали X12M, и анализа известных литературных источников [103–104].

В работе приняты следующие значения теплофизические характеристики:

- коэффициент теплопроводности $\lambda = 28 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;
- коэффициент температуропроводности $a = 7,78 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
- температура плавления $T_{\text{пл}} = 1400 \text{ °C}$;
- температура закалки $T_{\text{зак}} = 1000 \text{ °C}$.

Экспериментально установлено, что коэффициент поглощения $K_{\text{пог}} = 0,6$

Диаметр лазерного пучка принят постоянным $d_{\text{п}} = 4 \text{ мм}$, исходя из возможностей оптической системы применяемой лазерной установки.

Диапазон изменения скорости V перемещения лазерного луча по поверхности обрабатываемой поверхности определяли, исходя из следующих условий.

Значение максимальной скорости V_{\max} , которая зависит от технических характеристиками оборудования, принята равной $V_{\max} = 2 \text{ м/мин} \approx 33 \text{ мм/с}$.

Значение минимальной скорости V_{\min} , которая соответствует предельному случаю, принята равной $V_{\min} = 0$.

Диапазон изменения мощности P лазерного излучения оценивался исходя из следующих условий [61-63, 103].

Значение максимальной мощности P_{\max} определяется максимальной плотностью мощности лазерного излучения, при которой температура поверхности металла при $V_{\max} = 2 \text{ м/мин}$ достигает температуры плавления:

$$q_{\max} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot T_{\text{зак}}}{d_n} = \frac{2 \cdot 0,028 \cdot 1400}{4} = 20 \text{ Вт/мм}^2.$$

Значение минимальной мощности P_{\min} определяется минимальной плотностью мощности лазерного излучения q_{\min} , которая соответствует стационарному нагреву, когда температура поверхности металла достигает температуры закалки [103]

$$q_{\min} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot T_{\text{зак}}}{d_n} = \frac{2 \cdot 0,028 \cdot 1000}{4} = 14 \text{ Вт/мм}^2.$$

На основе полученных значений в экспериментах скорость движения лазерного пятна по обрабатываемой поверхности регулировали от 0,37 м/мин до 2,00 м/мин, а мощность лазерного излучения – от 520 Вт до 1450 Вт [103].

В каждой точке планируемой матрицы проводились три повторных опыта. Всего было проведено 72 опыта, результаты которых приведены в таблице 3.4 и на рисунке 3.7.

Таблица 3.4. – Экспериментальные данные по толщине лазерно-упрочненного слоя $h_{\text{зак}}$ образцов из стали X12M [103]

Номер точки матрицы	Параметры лазерной обработки		$h_{\text{зак}}$, МКМ
	P , Вт	V , м/мин	
1	1240	2,00	95
2		1,40	204
3		1,00	510
4		0,72	809
5		0,52	1020
6		0,37	1300
7	970	2,00	90
8		1,40	103
9		1,00	295
10		0,72	515
11		0,52	796
12		0,37	1100
13	850	2,00	0
14		1,40	0
15		1,00	92
16		0,72	204
17		0,52	610
18		0,37	890
19	720	2,00	0
20		1,40	0
21		1,00	0
22		0,72	85
23		0,52	96
24		0,37	197

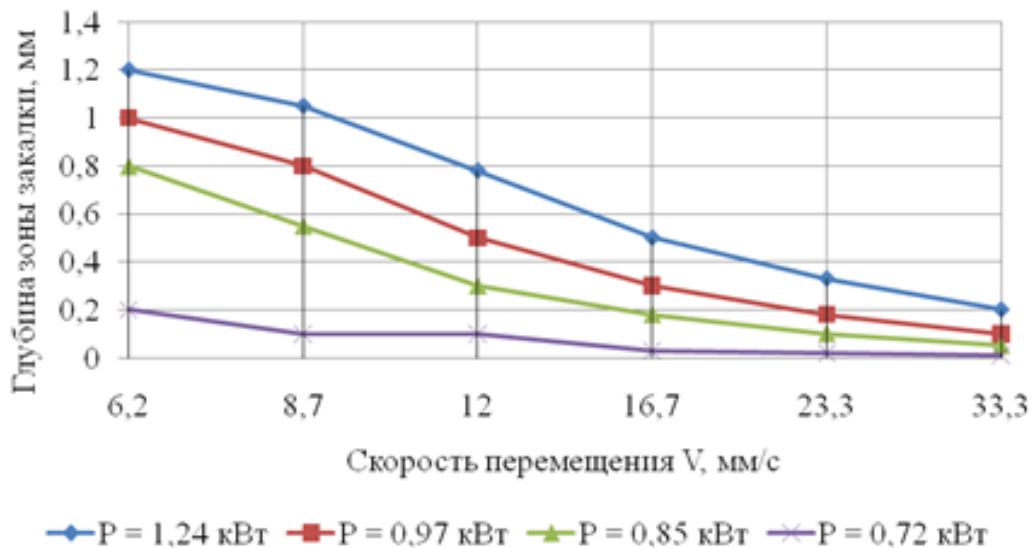


Рисунок 3.7 – Экспериментальные данные по толщине лазерно-упрочненного слоя $h_{\text{зак}}$ образцов из инструментальной легированной стали X12M [103]

Анализ экспериментальных данных показал, что толщина лазерно-упрочненного слоя $h_{\text{зак}}$ образцов из инструментальной легированной стали X12M без оплавления поверхности $h_{\text{зак}} = 750 \dots 800$ мкм, тогда как режимы с оплавлением обеспечивали глубину $h_{\text{зак}} = 1150 \dots 1350$ мкм [103].

На рисунке 3.8 показаны графики изменения толщины лазерно-упрочненного слоя $h_{\text{зак}}^*$ от относительной скорости V^* перемещения лазерного пятна при различных значениях относительной мощности лазерного излучения P^* [103].

Для построения обобщенных статистических зависимостей экспериментальные данные были преобразованы с использованием безразмерных параметров, рассмотренных в разделе 3.5.

Эксперименты показали, что при небольших значениях мощности лазерного излучения P^* температура поверхности металла достигает точки ликвидуса, что приводит переходу процесса лазерной закали в режим с оплавлением.

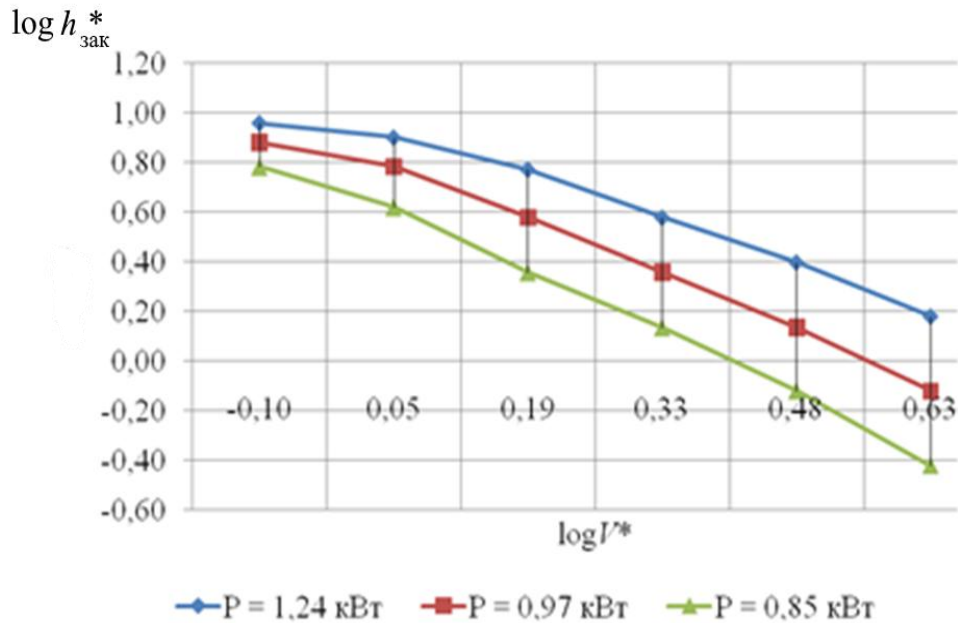


Рисунок 3.8 – Изменение толщины лазерно-упрочненного слоя $h_{\text{зак}}^*$ от относительной скорости V^* перемещения лазерного пятна при различных значениях относительной мощности лазерного излучения P^* [103]

После статистической обработки полученных опытных данных получена следующая зависимость, с помощью которой можно вычислить значение безразмерной глубины закаливания $h_{\text{зак}}^*$ без оплавления обрабатываемой поверхности по известным значениям безразмерной скорости V^* и безразмерной мощности лазерного излучения P^* .

$$h_{\text{зак}}^* = 0,00649 \cdot (P^*)^{2,22} \cdot (V^*)^{-2,0}.$$

Для практического применения данную зависимость удобно представлять графически в виде линий равного уровня $h_{\text{зак}}^* = \text{const}$, что дает возможность наглядно оценивать влияние параметров лазерного воздействия на глубину закаливания (рисунок 3.9).

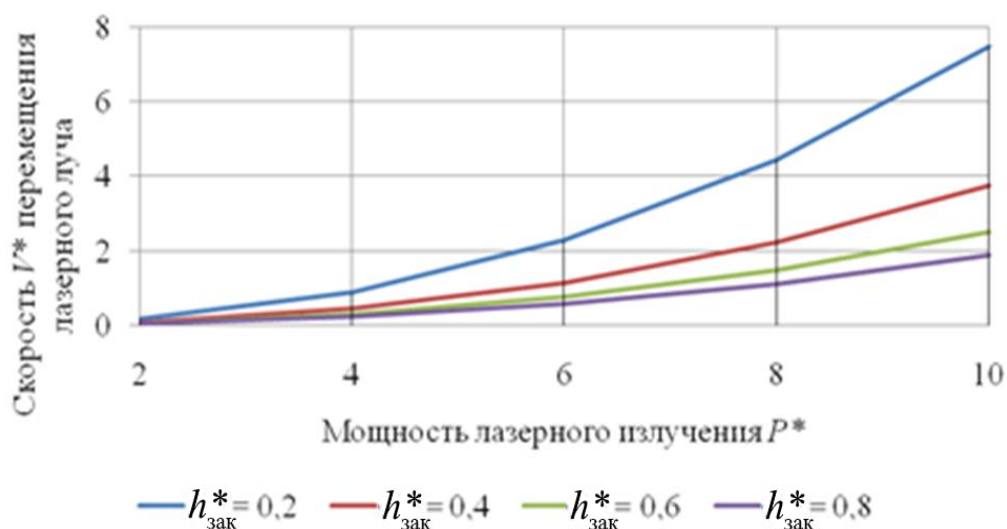


Рисунок 3.9 – Уровни толщины лазерно-упрочненного слоя $h_{\text{зак}}^* = \text{const}$ образцов из инструментальной легированной стали X12M [103]

При выборе параметров лазерной термической обработки инструментальной, легированной стали X12M (мощности P и скорости V перемещения лазерного луча) целесообразно использовать графическую диаграмму зависимости зоны закалки без оплавления поверхности (рисунок 3.10). В зоне лазерно-упрочненного слоя температура обрабатываемой поверхности $T_{\text{пов}}$ превышает температуру закалки $T_{\text{зак}}$, но расположена ниже температуры плавления $T_{\text{пл}}$.

Следует подчеркнуть, что полученные экспериментальные зависимости хорошо согласуются с результатами других исследователей, что подтверждает универсальность подхода, основанного на использовании безразмерных (обобщённых) параметров. Такой подход позволяет единообразно описывать процессы лазерной закалки для различных марок углеродистых и легированных сталей при изменении условий нагрева.

В данном разделе описаны экспериментальные исследования, которые проводились на установках с CO_2 -лазером непрерывного излучения мощностью 1,5 кВт. Целевой функцией была выбрана глубина зоны лазерного воздействия, характеризующая эксплуатационную стойкость и износостойкость рабочих поверхностей инструмента. На основе предварительных данных определены теплофизические параметры лазерной обработки и технологические

характеристики обрабатываемого материала. Разработан план эксперимента, в каждой точке матрицы которого проводили 3 опыта, при этом эксперимент включал 72 опыта. Результаты показали, что максимальная глубина закалки без оплавления поверхности составляет 0,75...0,80 мм; а при режимах с оплавлением достигает 1,15...1,35 мм. На основании статистической обработки результатов предложена обобщённая зависимость относительной глубины закалки от безразмерных параметров мощности и скорости, которая может быть использована для инженерных расчётов и оптимизации режимов лазерной термообработки различных марок инструментальных сталей.

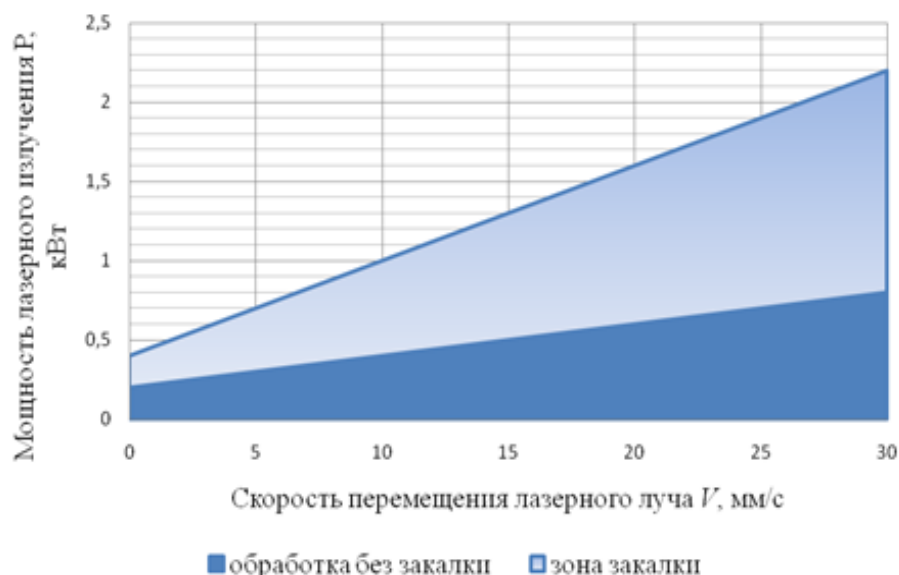


Рисунок 3.10 – Расположение зоны закалки стали X12М без оплавления поверхности [103]

3.7 Метод контроля геометрических параметров инструмента после процесса лазерной закалки

После закалки необходимо обеспечить контроль геометрических параметров инструмента. Для контроля геометрии тел сложной формы предлагается применять метод 3D-сканирования с последующим сопоставлением с эталонной моделью описанный далее.

В следующей части проводится эксперимент по сканированию с применением 3D -сканера геометрии на примере листовых деталей, полученных путем применения ступенчатой гибки. Для данных листовых деталей произведен захват геометрии, а также проведена сверка оцифрованной геометрии фактически изготовленных деталей с геометрией изначальной модели, проведен анализ ошибок и отношений для оценки точности производства.

Для сканирования деформированных полос и анализа отклонения геометрии реального объекта от эталонного образца – твердотельной 3D-модели составлен поэтапный план подготовительного процесса, включающий в себя следующие этапы.

1. Калибровка сканирующего оборудования.
2. Матирование черных и блестящих тел.
3. Подбор положения сканирования.
4. Съёмка тел.
5. Сшивание снимков.
6. Создание stl-сетки по сшитым сканам.
7. Наложение сетки на твердотельную модель – эталон.
8. Сбор и анализ полученных данных об отклонениях.

На каждом этапе имеются факторы, понижающие точность сканирования и наложения. Так, например, матирование добавляет слой матирующего вещества, что, пусть и незначительно, но увеличивает размеры тела, калибровка и съёмка сопряжены с изменением условий окружающей среды, а сшивание и наложение могут быть недостаточно точными из-за качества, полноты сканов или обилия артефактов сетки. Однако большинство факторов могут быть ликвидированы или вносят небольшой вклад в общую погрешность.

Оборудование и материалы.

- Оборудование: 3D -сканер *RangeVision Premium 2016.3*.
- Программное обеспечение: *ScanCenter NG, Geogamic Control X*.
- Материалы: металлические полосы гнутые.

Далее будет рассматриваться наиболее важный этап работы – подбор положения сканирования. Данный этап особенно важен, так как от правильного выбора положения зависят следующие переменные:

- время, затрачиваемое на сканирование;
- количество сканов и групп сканов;
- вес моделей и проекта сканирования;
- наличие различных элементов сканируемого тела;
- необходимость сшивания различных элементов сканируемого тела.

Твердотельная деталь-эталон представлена на рисунке 3.11.

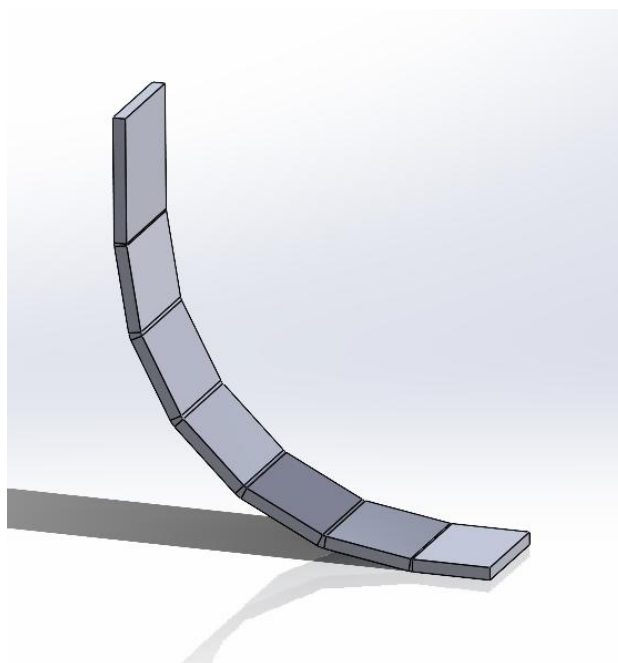


Рисунок 3.11 – Деталь – эталон

Для реализации были рассмотрены три варианта композиции съёмки – «сверху», «сбоку» и «сверху и снизу», представленные на рисунках 3.12-3.14.

В ходе дальнейшего сшивания по точкам получается изображение сверху, сбоку и с обеих сторон. В последнем случае необходимо было сшивать не только снимки внутри группы, но и группы снимков между собой. Ввиду тонких граней тела, массив точек, по которым проводится сшивание оказался достаточно малым, что негативно сказалось на точности дальнейших измерений.

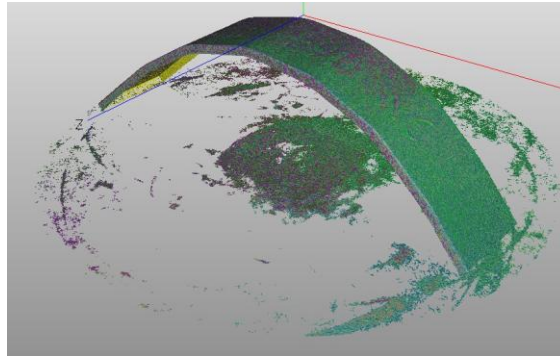


Рисунок 3.12 – Расположение объекта для съёмки «сверху» на поворотном столе

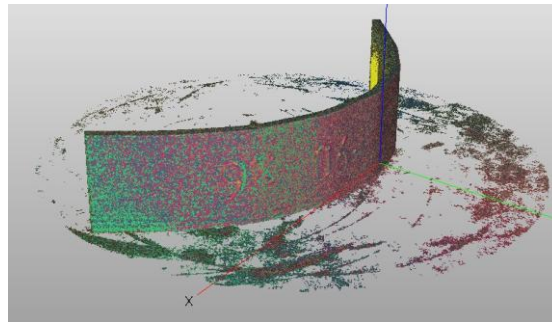


Рисунок 3.13 - Расположение для съёмки «сбоку» на поворотном столе

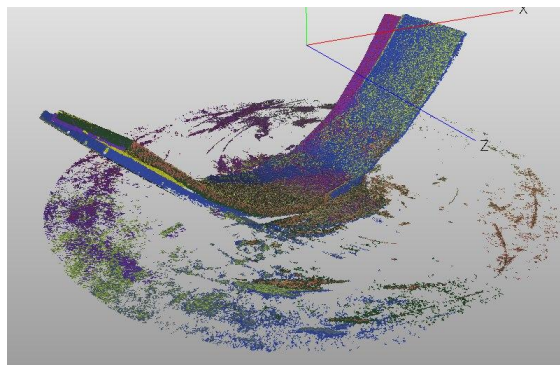


Рисунок 3.14 - Положение для съёмки «снизу» и последующего сшивания с другим ракурсом

Как можно заметить, во всех случаях имеются шумы в кадре снимков – это участки стола в кадре. Данные элементы перед сшиванием удаляются. Сшивание необходимо для исключения ошибок автоматического наложения по оси калибровочного стола. Пример такой ошибки можно наблюдать на рисунке 3.14.

Как можно заметить фиолетовый и зелёный участки сдвинуты относительно сине-желтого участка.

После сшивания группы сканов преобразовываются в *stl*-сетку для ее дальнейшего экспорта в специализированное ПО для анализа отклонений.

С помощью программного обеспечения происходит наложение сетки на эталон и сбор статистики отклонений. Пример наложения изображен на рисунке 3.15.

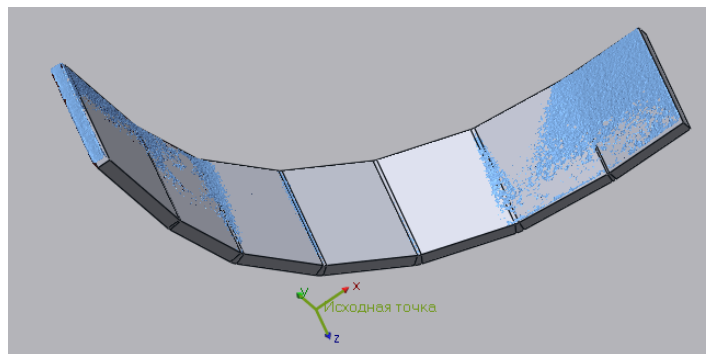


Рисунок 3.15 - Пример наложения; синее - сетка, серое модель

Затем производится анализ отклонений, собираются следующие данные (рисунок 3.16).

- Мин. – минимальное отклонение сетки.
- Макс. – максимальное отклонение сетки.
- Средн. – среднее отклонение сетки.
- Rms - среднеквадратичное значение шероховатости поверхности.
- Стд. Откл. - Стандартное отклонение — разброс данных.
- Пер. – усреднённое значение отклонения от среднего отклонения.
- Статистика – табличное дублирование собранных данных.
- 6 sigma – число точек, лежащих в пределах шести сигм и процентный показатель этого числа от общего числа (рисунок 3.17).
- Int. sigma – аналогично 6 sigma (рисунок 3.18).
- Гистограмма – графическое отображение отклонения ошибки от средней ошибки (рисунок 3.19 – 3.20).

- Чем график более острый и собранный в центре, тем более точное соответствие сетки модели.

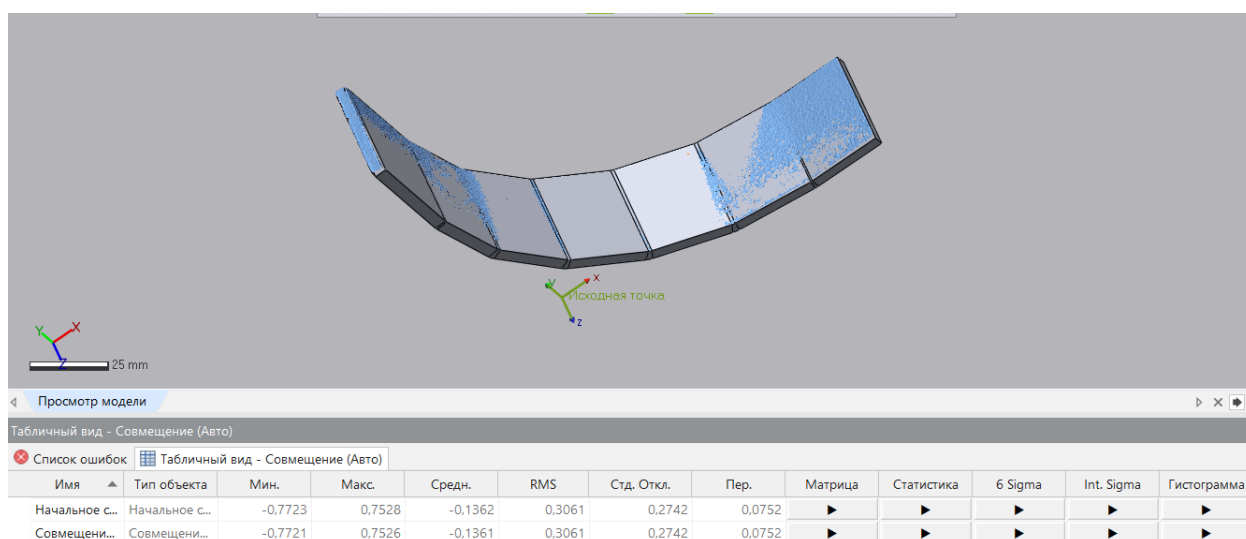


Рисунок 3.16 – Интерфейс ПО с отображением тела, сетки и статистики

-6σ	0	0 %
-5σ	0	0 %
-4σ	0	0 %
-3σ	144	0,9506 %
-2σ	2643	17,4478 %
-1σ	4799	31,6807 %
1σ	4793	31,6411 %
2σ	2521	16,6425 %
3σ	244	1,6108 %
4σ	4	0,0264 %
5σ	0	0 %
6σ	0	0 %

Рисунок 3.17 – Численное и процентное отображение принадлежности точек зонам среднеквадратичного отклонений

±1σ	9592	63,3219 %
±2σ	14756	97,4122 %
±3σ	15144	99,9736 %
±4σ	15148	100 %
±5σ	15148	100 %
±6σ	15148	100 %

Рисунок 3.18 – *int. sigma*

Совмещение наилучшим образом1

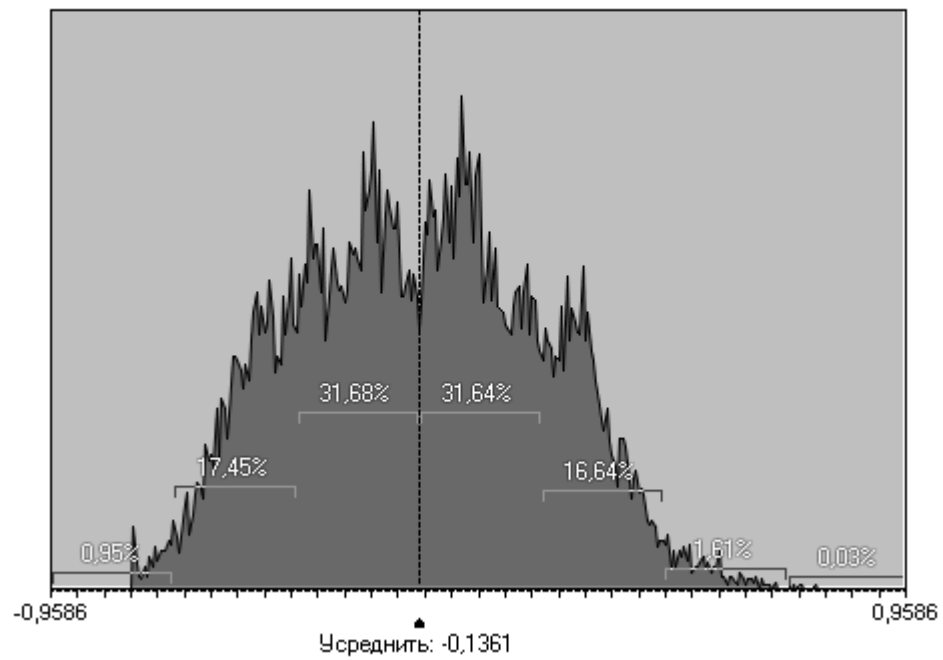


Рисунок 3.19 – График, имеющий более вытянутую и собранную структуру

Совмещение наилучшим образом1

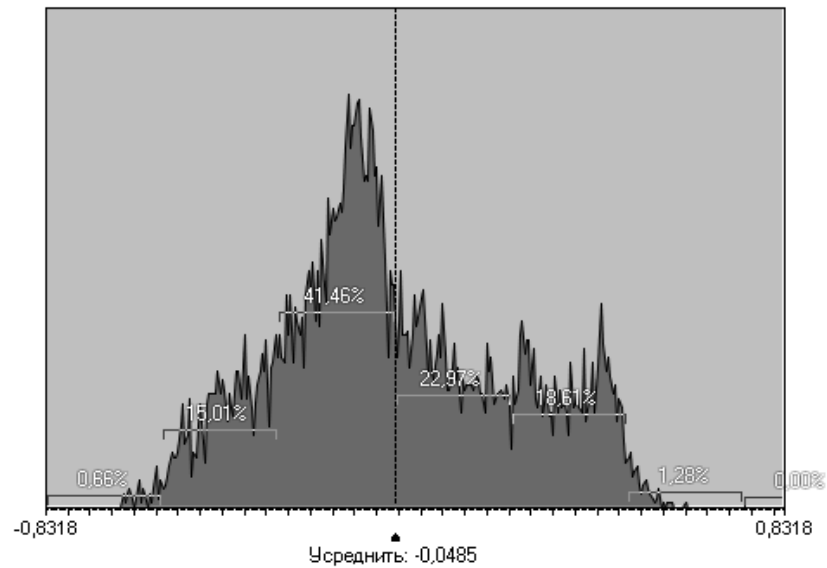


Рисунок 3.20 – График, собранный в центре, но с пиковым отклонением на границе 2σ

Пиковые значения на краях зон *sigma* могут свидетельствовать о грубом несоответствии сетки и эталона ввиду плохого наложения или высокой степени деформации сканируемого тела.

На рисунке 3.21 показана статистика, собранная в результате наложения трёх групп сканов с эталоном. Снизу вверх статистика по комбинированной группе сканов, а также снятым сбоку и сверху группам сканов. Статистика показывает оценку точности измерений, отклонения и точность сшивки поверхностей.

Имя	Тип объекта	Мин.	Макс.	Средн.	RMS	Стд. Откл.	Пер.	Матрица	Статистика	6 Sigma	Int. Sigma	Гистограмма
Начальное с...	Начальное с...	-0.841	0.6858	-0.1786	0.3265	0.2734	0.0748	▶	▶	▶	▶	▶
Совмещени...	Совмещени...	-0.841	0.6857	-0.1786	0.3265	0.2734	0.0748	▶	▶	▶	▶	▶
Просмотр модели												
Табличный вид - Совмещение (Авто)												
Список ошибок												
Имя	Тип объекта	Мин.	Макс.	Средн.	RMS	Стд. Откл.	Пер.	Матрица	Статистика	6 Sigma	Int. Sigma	Гистограмма
Начальное с...	Начальное с...	-0.762	0.5714	-0.1438	0.309	0.2735	0.0748	▶	▶	▶	▶	▶
Совмещени...	Совмещени...	-0.762	0.5714	-0.1438	0.309	0.2735	0.0748	▶	▶	▶	▶	▶
Просмотр модели												
Табличный вид - Совмещение (Авто)												
Список ошибок												
Имя	Тип объекта	Мин.	Макс.	Средн.	RMS	Стд. Откл.	Пер.	Матрица	Статистика	6 Sigma	Int. Sigma	Гистограмма
Начальное с...	Начальное с...	-1.4722	1.3988	0.0023	0.6054	0.6054	0.3665	▶	▶	▶	▶	▶
Совмещени...	Совмещени...	-1.8097	1.8057	-0.01	0.7049	0.7048	0.4968	▶	▶	▶	▶	▶
Совмещени...	Совмещени...	-0.2421	0.2296	-0.0109	0.0946	0.094	0.0088	▶	▶	▶	▶	▶

Рисунок 3.21 - Статистика по комбинированной группе,
боковой съёмке и верхней съёмке

Группа снимков сверху имеет наименьшие значения погрешности. Это связано с тем, что из-за деформации материала, съёмка внутренней поверхности добавляет общую погрешность ввиду увеличения процента точек, лежащих вне эталонных границ, а также с тем, что происходит ухудшение качества поверхности сетки ввиду тонких переходных рёбер, которое приводит к снижению качества совмещения элементов. В связи с этим рекомендуется в качестве основной поверхности для анализа проводить сканирование именно наружного участка геометрии.

Принимая во внимание то, что реальный объект сканирования близок к идеальному и имеет минимальные отклонения от эталона, высокие показатели отклонений указывают на неверный выбор положения. Можно сделать вывод, что описанный подход применения лазерного трехмерно сканирования применим к

оценке точности геометрических показателей как закаленного инструмента, так и листовых деталей и может быть применен для развития данной работы в части оценки степени точности конечной геометрии деформированной листовой детали.

Выводы по главе 3

В рамках проведённого исследования, используя фундаментальные положения теории размерностей, предложены относительные (безразмерные) комплексы, с помощью которых осуществлено обобщенное представление процессов термической обработки различных сталей с помощью лазерного излучения. В отличие от известных аналогов, представленных в научно-технической литературе, предложенные комплексы одновременно учитывают технологические характеристики лазерной обработки и теплофизические свойства обрабатываемого материала, что придаёт им отчётливо выраженный физический смысл и повышает универсальность их использования. Введение таких параметров позволяет разрабатывать математические модели процессов лазерной закалки, а также проводить оптимизацию режимов термообработки и смежных технологических операций.

В работе представлены результаты серии экспериментальных исследований, направленных на установление влияния режимов лазерного излучения на глубину упрочнённого слоя рабочих элементов вырубных штампов, изготовленных из сталей различных структурных классов (У8, 40ХН2МА, 5ХВ2С, 9ХС, Х12М). Показано, что после лазерной термообработки объём остаточного аустенита в 1,5–2,5 раза превышает его содержание после традиционной объемной закалки. Установлено, что значения глубины и твёрдости закалённого слоя зависят от структурного класса стали: максимальные показатели отмечены у эвтектоидной стали У8 и заэвтектоидной стали 9ХС, тогда как доэвтектоидная сталь 40ХН2МА и ледебуритная Х12М характеризуются меньшей глубиной упрочнения.

Обработка полученных данных показала, что в первом приближении толщина зоны упрочнения пропорциональна коэффициенту теплопроводности

материала. Для деталей, к которым предъявляются требования повышенной глубины упрочнённого слоя, рекомендуется применять стали, легированные кремнием, преимущественно с его повышенным содержанием в поверхностной зоне.

Анализ опубликованных отечественных и зарубежных исследований показал, что зависимости глубины закалки от технологических параметров лазерной обработки, как правило, имеют нелинейный характер, а полученные авторами результаты затруднительно сопоставить из-за неполноты сведений о конкретных условиях экспериментов и различий в исходных предпосылках. Известные аналитические зависимости удобны для качественного анализа тепловых процессов, однако при практическом расчёте глубины зоны упрочнения они не обеспечивают достаточной точности, что связано с отклонениями реальных процессов лазерного нагрева от принятых теоретических допущений.

Ввиду недостаточной разработанности теоретических аспектов взаимодействия лазерного излучения с инструментальными сталями, для построения адекватной математической модели применили метод планирования эксперимента, в котором в качестве целевой функции использовали толщину лазерно-закаленного слоя $h_{\text{зак}}$.

Поскольку при лазерной термообработки протекающие тепловые процессы имеют нелинейный характер, то в соответствии с рекомендациями по математическому планированию экспериментов, для построения математической модели глубины $h_{\text{зак}}$ лазерно-закаленного слоя применили ортогональный композиционный план третьего порядка, содержащий 20 точек, при этом в каждой точке плана испытывали 3 образца, т.е. всего было проведено 60 опытов. Глубину зоны термического воздействия оценивали на основе металлографического анализа микрошлифов. Стандартная процедура оценки, полученной статистической модели, предусмотренная в методе математического планирования экспериментов, показала её адекватность и достоверность полученных результатов при

определении толщины лазерно-закаленного слоя технологического инструмента из углеродистой инструментальной стали У8.

Для расширения применимости модели и возможности её переноса на другие инструментальные стали впервые предложено использовать обобщённые безразмерные параметры — относительную глубину закалки $\hat{h}_{\text{зак}}$ и комплексный показатель лазерного излучения k . Полученная формула содержит обобщенные параметры процесса непрерывной лазерной обработки (скорости V^* и мощности P^*) и теплофизические характеристики материала (a , λ , $T_{\text{пл}}$), и поэтому её можно использовать для оценки глубины лазерно-закаленного слоя $h_{\text{зак}}$ практически любых углеродистых и легированных инструментальных сталей, которые применяются для изготовления технологического инструмента листогибочных прессов.

Сопоставление с результатами, опубликованными другими исследователями, и экспериментальные данные по закалке сталей У10, 9ХС, Х12М и 40ХН2МА показали высокую степень соответствия полученных величин предложенной обобщённой зависимости.

Рассмотрена эффективность применения лазерной служебных свойств технологического инструмента ступенчатой гибки тонколистового металла. Для описания термодинамических процессов предложено использовать физически ясные безразмерные параметры, учитывающие как режимные характеристики излучения, так и свойства материала — относительная мощность, относительная скорость перемещения луча и относительная глубина упрочнённого слоя.

На основании экспериментальных данных по лазерной обработке, легированной стали 40ХН2МА построены графические зависимости и выведены эмпирические уравнения, связывающие относительную глубину зоны закалки с относительной мощностью и скоростью перемещения лазерного луча. Установлено, что полученные соотношения являются универсальными и могут быть использованы для расчёта аналогичных параметров при обработке других марок сталей, поскольку они основаны на обобщённых (безразмерных) параметрах.

Представлены результаты исследования поверхностного лазерного упрочнения стали Х12М, выполненного на установках с СО₂-лазером непрерывного действия мощностью 1,5 кВт. В качестве целевой функции принята глубина зоны термического воздействия — ключевой показатель, определяющий износостойкость и долговечность инструмента. На основе предварительных испытаний уточнены теплофизические параметры материала и диапазоны технологических факторов.

Полученные результаты показали, что максимальная глубина закалки без оплавления поверхности составляет 0,75–0,80 мм, тогда как при режимах, сопровождающихся плавлением, глубина значительно возрастает. Для приведения данных к единому виду выполнено безразмерное преобразование параметров, что позволило построить унифицированную зависимость относительной глубины закалки от обобщённых параметров лазерной обработки. Итогом обработки экспериментальных данных стало получение эмпирической формулы, обеспечивающей определение относительной глубины упрочнённой зоны при заданных режимах лазерной термообработки без оплавления поверхности.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ СТУПЕНЧАТОЙ ГИБКИ

4.1 Прототипирование технологии ступенчатой гибки тонкостенных корпусов

Производство многочисленных изделий, необходимых в различных отраслях науки и технике, связано с изготовлением большого количества тонкостенных деталей (резервуары и котлы; металлическая посуда; детали автомобилей, самолетов, вагонов и др.), которые выполнены из листового или профильного металла. Одним из основных классов тонкостенных деталей, выполненных листовой штамповкой, являются детали одинарной кривизны, которые получают с помощью гибки [105 – 107]. Гибка – это процесс штамповки, при котором изменяется кривизна листовой заготовки в плоскости изгиба с целью получения деталей пространственной формы.

Применительно к классу тонкостенных деталей одинарной кривизны в производстве используются ряд способов формоизменения: гибка в инструментальных штампах на кривошипных и эксцентриковых прессах; свободная гибка в универсальных штампах на специальных гибочных прессах; гибка-прокатка на валковых станках; гибка с растяжением на специальных профилегибочных станках и др.

В работах [108 – 109] рассмотрены вопросы изготовления тонкостенных корпусов [47] небольших устройств мелкосерийного или единичного производства с использованием принципов прототипирования, которое в последнее время широко используется для тестирования и оценки идей на самой ранней стадии разработки, а в некоторых случаях и для проверки функционирования прототипа устройства [110]. Часто, прототипирование относят к производству индивидуальных изделий, и, исходя из этого, применяют технологии, подходящие для единичного производства. На практике же приходится использовать гораздо более дорогостоящие способы производства, более подходящие для производства

мелких серий (до нескольких сотен изделий). Такой подход является нерентабельным с точки зрения расходования ресурсов и экономических затрат.

На основе практического опыта было выявлено, что современное прототипирование предъявляет высокие требования к внешнему виду итогового изделия — это связано с тем, что будущий прототип, с высокой долей вероятности, необходимо продемонстрировать на промышленных выставках и/или представить перед инвесторами.

Рассмотрим применяемые технологии гибки металлов по радиусу, одной из них является гибка на вальцах. Вальцовка (вальцевание) — процесс гибки металла на вальцах с большими радиусами скруглениягиба. При прокатке металла между валками происходит равномерная деформация металла на определенный угол, вследствие чего лист металла приобретает форму равномерно свернутого цилиндра. Любые вальцы имеют предел на толщину металла и на минимальный радиус вальцовки. Чем толще металл, тем меньше радиус приобретет лист на выходе и тем больше должны быть радиусы валков, установленных на вальцах, но увеличение радиуса валков приведет к уменьшению минимального радиусагиба при вальцовке тонколистовых металлов. Обработке подвергаются любые пластичные металлы, резиновые смеси, пластмассы. С помощью вальцевания получают готовые детали, точные заготовки для штамповки и др.

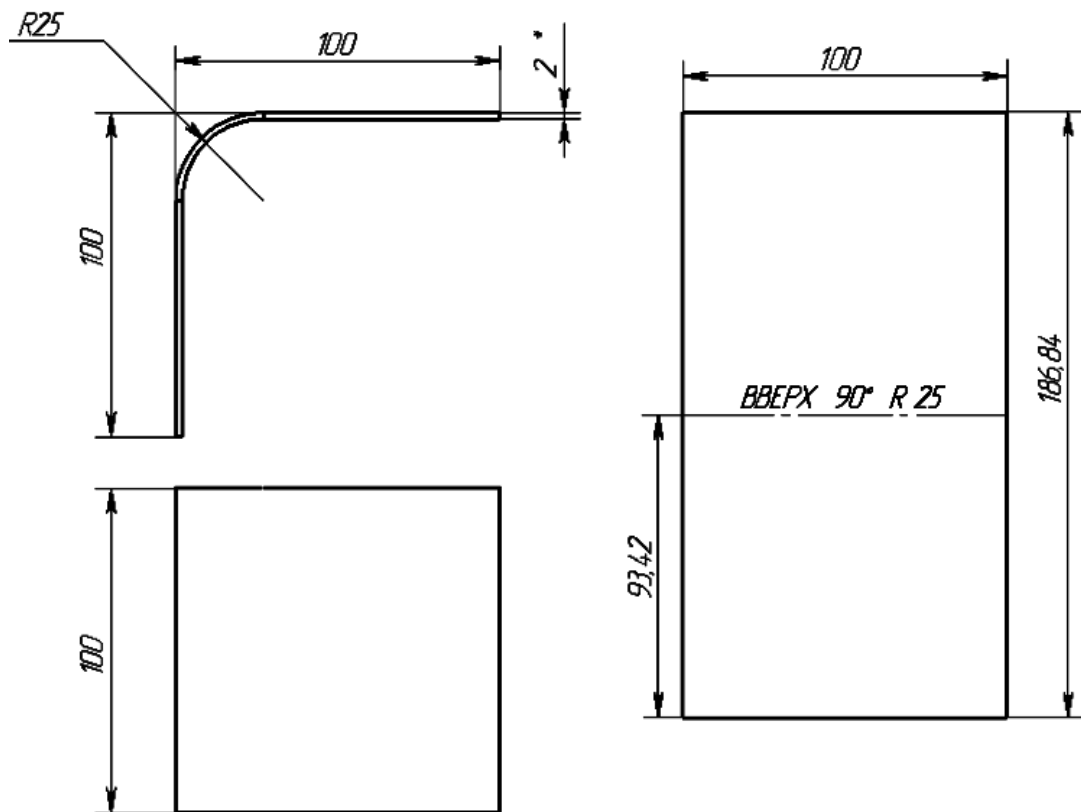
Холодную гибку листовых элементов толщиной до 60 мм для получения деталей цилиндрической и конической формы осуществляют на листогибочных вальцах с валками длиной до 13 м. При вальцовке в холодном состоянии отношение радиуса изгиба к толщине листа ограничивают допустимым значением создаваемой пластической деформации. Вальцевание металла позволяет задавать различные параметры радиусных гибов и допускается к использованию на листах различной толщины (с предварительным нагревом для толстолистовых заготовок). Вальцы для данной операции являются дорогостоящим оборудованием в связи с высокими прочностными характеристиками исходных материалов и высокой чистоты поверхности самих вальцов. Благодаря настраиваемым радиусам изгиба

операция является относительно универсальной, но сложно применимой в изготовлении корпусов небольших устройств мелкосерийного или единичного производства.

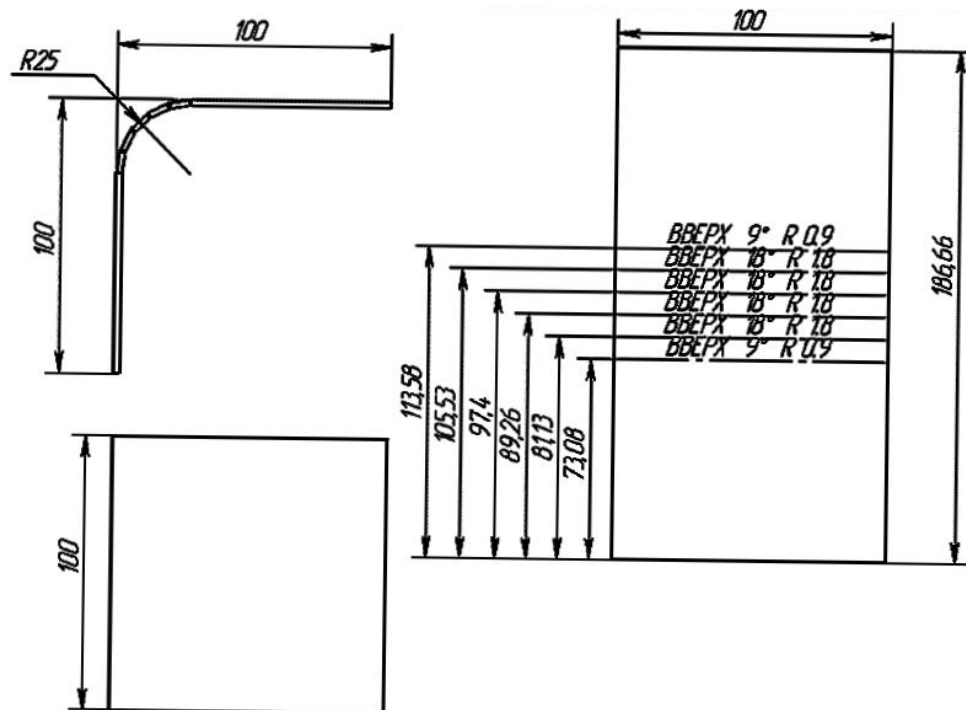
Другой технологией является V-гибка в инструментальных штампах с использованием специализированной оснастки, в которой пуансон и матрица имеют форму и размеры, сопряженные с формой штампуемой детали. Основным недостатком данного метода является, то что для каждого определенного радиуса необходим индивидуальный инструмент. Этим обуславливается высокая стоимость единицы продукции и сложность применения в мелкосерийном и единичном производстве.

На основе несоответствия технологий серийности производства следует рассмотреть альтернативный вариант производства корпусов с большими радиусами гиба. На наш взгляд, с учетом требований, предъявляемых к качеству корпусов, наиболее подходящим вариантом является технология пошаговой (ступенчатой) гибки, которая представляет собой по сути многократную V-гибку. Этот метод использует множество последовательных V-образных изгибов для получения большого радиуса заготовки. Окончательное качество зависит от количества изгибов и шага между ними - чем их больше изгибов, тем более гладким будет поверхность изделия. Данная технология находит применение в кораблестроении, где необходимо осуществить гибку листового металла большого радиуса.

Суть технологии пошаговой гибки заключается в замене одного гиба большого радиуса на несколько гибов с меньшим радиусом и углом (риснок 4.1). Данный способ больше подходит для единичного производства, имеет широкую универсальность, не требует применения дополнительного оборудования и оснастки помимо самого листогибочного прессы.



a



б

a – один проход; б – несколько проходов

Рисунок 4.1 – Схемы гибки листового металла с большим радиусомгиба

При уменьшении радиуса изгиба металла происходит увеличение напряжений в местах деформации, это необходимо принимать во внимание, так как происходит значительное уменьшение радиуса деформации. Частично, величина напряжений компенсируется меньшим углом изгиба, но следует принимать во внимание особенности материала и минимальные радиусы гибов для листов определенной толщины.

Сравнение технологий производства происходило с привлечением двух различных предприятий, корпуса для которых необходимо было изготовить с применением листов толщиной в 1 мм и 4 мм. При изготовлении использовались листогибочные прессы *ЕНТ profipress 130* на базе предприятия ООО «Профлазермет» [111 – 112] и *Durma AD-R 25100* на базе предприятия «*BASEMENTLAB*» [113 – 114]. В обоих случаях станки управляются с помощью ЧПУ, что позволяет производить операции с высокой точностью.

В ходе работы изготовлены корпуса устройства с применением технологии ступенчатой гибки и гибки с использованием традиционной оснастки, при этом заданный радиус выдерживался в обоих случаях. Полученные корпуса полностью соответствовали изначальному дизайну, заложенному при промышленном проектировании. На внутренней стороне изгиба, в случае пошаговой гибки, наблюдается ряд прямых участков, не подвергающихся деформации, при этом с внешней стороны изгиба данные участки практически не прослеживаются несмотря на малую толщину листа. Для их предотвращения следует увеличить количество пошаговых изгибов (см. раздел 2.2). Суммарный угол деформации при ступенчатой гибке должен быть равен изначально планируемому углу загиба. Размеры изгибов, расположенных по краям, выполняются в два раза меньше размеров центральных гибов.

В некоторых случаях поверхность изделия после ступенчатой гибки необходимо подвергать дополнительной обработке, что позволяет устранить какие-либо внешние отличия от гибки с применением серийных технологий V-гибки. В случае с корпусом из 4 мм металла, требовалась покраска, для подготовки

поверхность подвергалась грубой шлифовке с последующим нанесением грунта (рисунок 4.2). Все эти операции значительно сгладили прямые участки, сделав изделие внешне неотличимым от альтернативных ей технологий.



Рисунок 4.2 – Корпус устройства, выполненный из стального листа толщиной 4 мм с применением технологии пошаговой гибки и последующей обработкой поверхности

Экономические затраты на применение технологии ступенчатой гибки выражаются в общем количестве изгибов на единицу изделия. При увеличении серии производимых прототипов корпуса стоимость растет прямо пропорционально количеству изделий, это необходимо учитывать при закладывании стоимости производства тестовых образцов. При наличии перспективы производства большого количества тестовых корпусов или заведомого отсутствия изменений в конечной конструкции следует рассматривать в сравнении и серийные методы производства. Поэтому технологию ступенчатой гибки можно рассматривать как конкурентоспособную в случае производства прототипов тонкостенных корпусов различных изделий.

Рассмотрены вопросы изготовления тонкостенных корпусов небольших устройств мелкосерийного или единичного производства с использованием принципов прототипирования. С учетом требований, предъявляемых к качеству корпусов, выбрана технология ступенчатой (пошаговой) гибки, в которой используется множество последовательных V-образных изгибов для получения большого радиуса заготовки. В ходе работы изготовлены корпуса устройства с применением технологии пошаговой гибки и гибки с использованием традиционной оснастки, при этом заданный радиус выдерживался в обоих случаях. Показано, что способ пошаговой гибки больше подходит для единичного производства, имеет широкую универсальность, не требует применения дополнительного оборудования и оснастки помимо самого листогибочного пресса. Приведен пример практического применения данной технологии.

4.2 Применение ступенчатой гибки для прототипирования бампера стерилизатора

В различных отраслях народного хозяйства (медицина, фармацевтика, ветеринария, косметология, пищевая промышленность и др.) для стерилизации изделий широко применяются плазменные технологии, которые отличаются универсальностью использования, что позволяет стерилизовать большое разнообразие изделий и материалов [115-118]. На практике наибольшее распространение получили стерилизаторы, в которых в качестве активного агента используется ионизированный газ, образующийся при низком давлении – низкотемпературная плазма. В качестве стерилизующего агента обычно применяют пероксид водорода, который подается в рабочую вакуумную камеру, где в результате воздействия на обрабатываемые изделия (материалы) происходит нарушение процессов жизнедеятельности микроорганизмов. Низкотемпературная плазма практически не оказывает влияние на конструкционные материалы, что обеспечивает возможность стерилизации изделий, выполненных из различных материалов (металл, пластик, текстиль и др.). Применение плазменных технологий

особенно эффективно для обработки материалов, чувствительных к действию высокой температуры и влаги, а также инструментов и изделий со специальными покрытиями или красками [119-121].

С применением технологии ступенчатой гибки [122-123] изготовлены различные тонкостенные детали прототипа универсального плазменного низкотемпературного стерилизатора серии Пластер Мед ТеКо [124]. В качестве примера использования технологии ступенчатой гибки рассмотрим процесс получения дугообразного сегмента бампера двери стерилизатора, аксонометрическое изображение которого показано на рисунке 4.3, а его продольный разрез на рисунке 4.4. Окончательное качество заготовки при такой формовке зависит от количества изгибов и шага между ними - чем их больше, тем более гладким будет поверхность изделия.

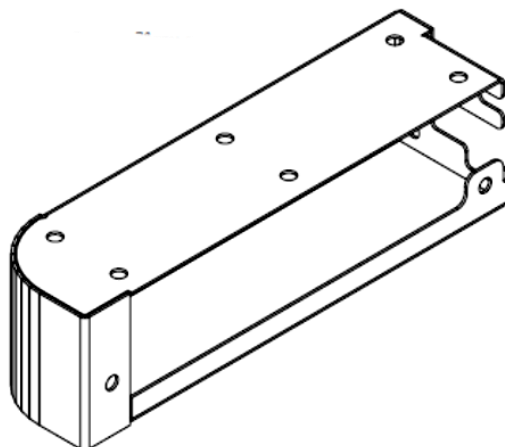


Рисунок 4.3 – Аксонометрическое изображение бампера двери стерилизатора

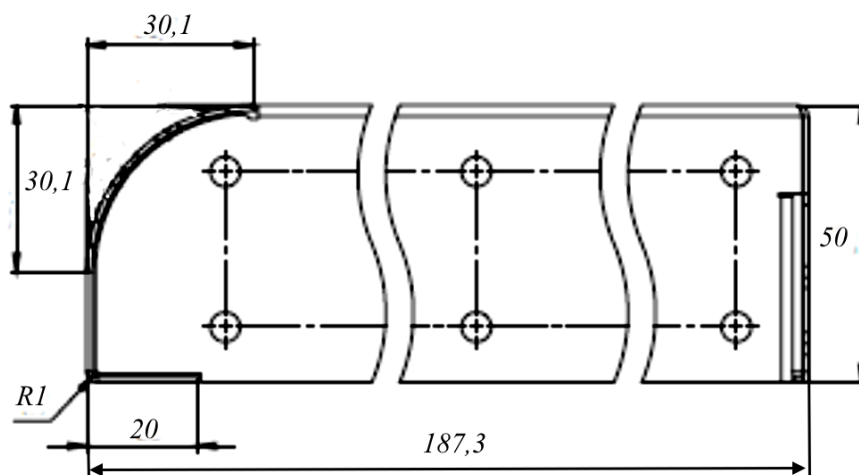


Рисунок 4.4 – Продольный разрез чертежа бампера двери стерилизатора

В работе [42] приведены выражения для углов изгиба каждой ступени и разница между полученным ступенчатым профилем в виде полилиний и заданного дугообразного профиля (окружности). С использованием безразмерных (относительных) параметров выведена формула для определения угла изгиба ступени в зависимости от перемещения пуансона, на основе которой сделаны предложения по выбору числа изгибов, необходимого для обеспечения технических требований к профилю данного изделия. Показано, что для деталей, наружные размеры которых должны быть выполнены по качеству $h12$ (ГОСТ 25346-2013), количество ступеней должно быть $Z_{ст} \geq 10$, по качеству $h14$, - $Z_{ст} \geq 6$.

В рассматриваемом случае с некоторым запасом принято $Z_{ст} = 10$, и поэтому угол изгиба, соответствующий одной ступени; $\alpha_{ступ} = 9^\circ$. При этом, как сказано выше, для обеспечения более плавного перехода дуги в прямолинейный участок заготовки (т.е. в начале и конце дугообразного сегмента) угол ступени целесообразно принимать равным половине угла центральных сегментов, т.е. на концевых участках $\alpha_{ступ} = 4,5^\circ$. Развернутый вид деформируемой заготовки бампера двери с указанием линий изгиба показан на рисунке 4.5.

Рассмотрены вопросы изготовления тонкостенных деталей с дугообразными элементами аппаратов и приборов мелкосерийного или единичного производства с применением технологии ступенчатой (пошаговой) гибки, в которой используется множество последовательных V -образных изгибов для получения заданного радиуса заготовки. С применением этой технологии изготовлены различные тонкостенные детали прототипа универсального плазменного низкотемпературного стерилизатора серии Пластер Мед ТеКо. Практическое применение данной технологии рассмотрена на примере получения дугообразного сегмента бампера двери стерилизатора.

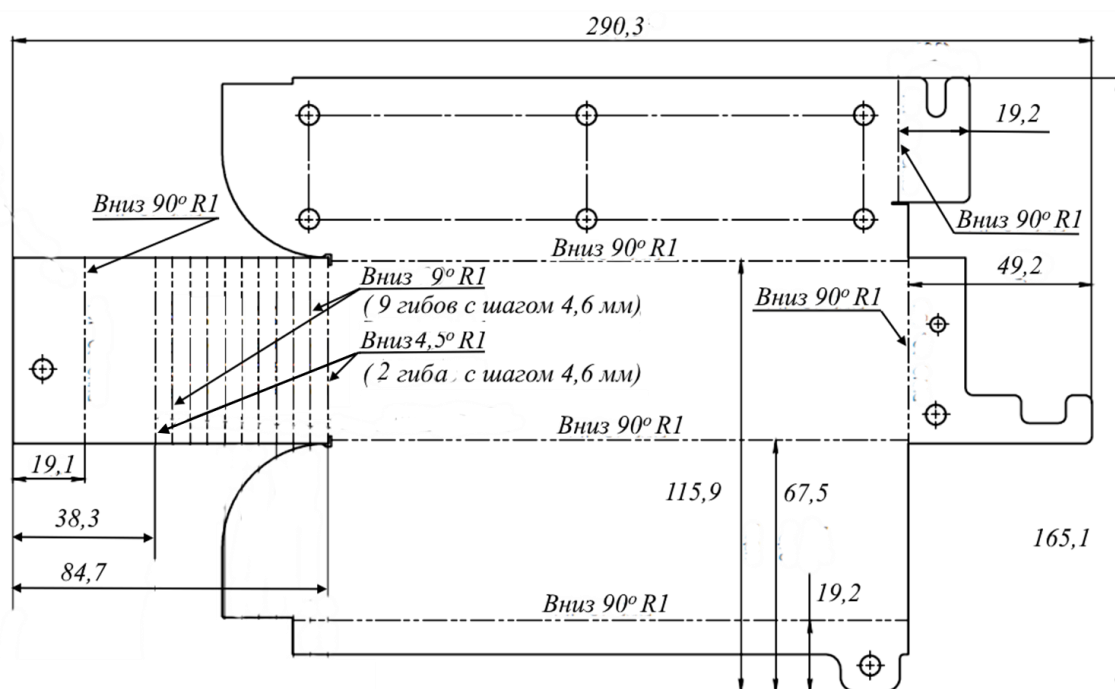


Рисунок 4.5 – Развернутый вид деформируемой заготовки бампера двери стерилизатора с указанием линий изгиба

4.3 Импортзамещение рабочего инструмента листогибочного прессы *Coastone cone 900*

Во многих отраслях промышленности широко используются тонкостенные детали, изготовленные из металлических листов. При этом одним из наиболее эффективных и экономичных способов обработки давлением, применяемых при их производстве, является листовая штамповка, в частности, гибка, при которой изменяется кривизна листовой заготовки в плоскости изгиба с целью получения деталей пространственной формы. Гибка листового материала является частным случаем листовой штамповки, при этом удельный вес гибочных работ непрерывно увеличивается [126 – 128].

В листогибочных прессах требуемая форма или заданный угол металлического листа формируются при воздействии на него пуансона и матрицы – основных рабочих инструментов такого оборудования. Пуансон крепится на траверсе, а матрица располагается на столе станка, лист заводится между матрицей и пуансоном, а для создания усилия, формирующего металлический лист,

применяют гидравлический, пневматический или электрический привод. Одной из основных проблем в эксплуатации пуансонов и матриц является их износ, что приводит к необходимости регулярной замены. В России отсутствуют производители рабочего инструмента, что приводит к увеличению затрат на производство и вынуждает искать других зарубежных поставщиков или приводит к необходимости импортозамещения данных элементов гибочных прессов.

В статье рассматриваются вопросы импортозамещения рабочего инструмента зарубежных листогибочных прессов методом обратного инжиниринга (реверс-инжиниринга) на примере листогибочного прессы *COASTONE CONE 900*, установленного на предприятии ООО «ИВКОНСТРУКТИВ».

На предприятии гибочный инструмент используется в процессе производстве металлической мебели, дверей и сейфов. При круглосуточной работе производства замена требуется раз в 2-3 месяца, что существенно влияет на технико-экономические показатели и качество выпускаемой продукции. Основной причиной выхода из строя является деформация рабочих кромок инструмента, который не подлежит восстановлению и поэтому единственный выход — это его замена. Сложность изготовления рабочего инструмента состоит в отсутствии конструкторской документации на пуансоны и матрицы, что заставляет прибегать к самостоятельному её созданию путём обратного инжиниринга, который включает в себе технологию создания модели изделия за счёт прямых измерений. Качество и скорость подобных процедур зависят от используемого инструмента, а также его погрешности.

Традиционные методы измерения объекта достаточно трудоемки и их применение требует значительных затрат времени, и поэтому в данной работе использована технология лазерного сканирования [130– 131]. Сканирующие 2D и 3D-системы применяют для получения геометрической информации об объекте. На основании полученного результата можно подготовить: карту отклонений геометрических размеров, сопоставить допуски по форме и расположению, точную

3D-модель для численного анализа или определить скорости, перемещения и деформации отдельных точек исследуемого изделия.

Для создания цифровых моделей пуансона и матрицы применено лазерное 3D-сканирование. Технология бесконтактная, работает на близких и дальних расстояниях, исключает повреждения объектов во время сканирования. Принцип работы лазерных 3D-сканеров состоит в том, что направленный лазерный луч отражается от поверхности предмета, образуя облако точек. Каждая точка имеет свои координаты в пространстве. Программное обеспечение определяет их и создает готовую трехмерную цифровую модель на основе этих данных.

Созданные 3D-модели пуансона и матрицы представлены на рисунках 4.6 и 4.7.

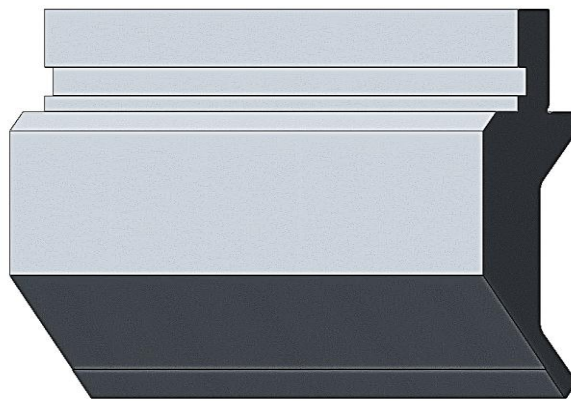


Рисунок 4.6 – 3D-модель пуансона



Рисунок 4.7 – 3D-модель матрицы

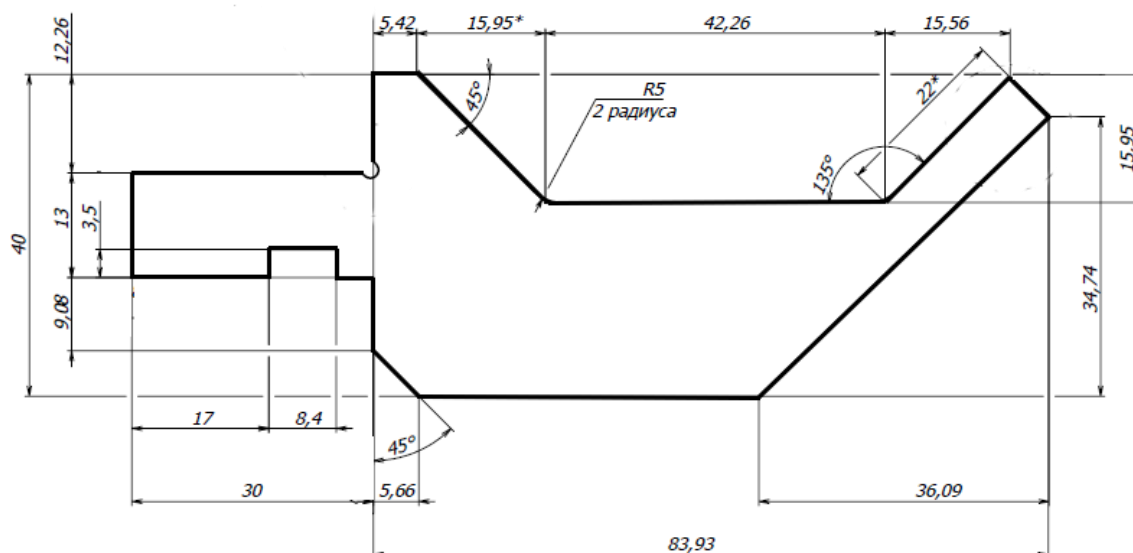
Создание чертежа на основе 3D-модели позволяет получить детальную техническую документацию, которая упрощает процесс производства и повышает его качество. Созданные чертежи гибочных инструментов приведены на рисунках 4.8 и 4.9.

Материал гибочного инструмента должен обладать определенными физико-механическими свойствами, чтобы обеспечить эффективность, долговечность и безопасность процесса гибки. Для материала пуансона и матрицы основными требованиями являются прочность (рабочие инструменты должны выдерживать динамические нагрузки, возникающие в процессе гибки металла) и износостойкость (рабочие поверхности гибочного инструмента должны иметь высокую твердость, чтобы предотвратить его износ или повреждения при контакте с металлом).

В зарубежной практике современный гибочный инструмент листогибочных прессов изготавливают преимущественно из высоколегированной стали 42CrMo4 (стандарт *EN 10083:2007*) с высокой прокаливаемостью, ударной вязкостью и обрабатываемостью [132]. Сталь имеет небольшую деформацию при отпуске, высокий предел усталости и устойчивость к многократному удару после закалки и отпуска.

Для матриц находит применение также углеродистая сталь C45 для закалки и отпуска, которая проста в обработке и поэтому широко используется в промышленности. Чаще всего она используется для производства инструментов и элементов машин, которые подвержены средним нагрузкам и в то же время очень устойчивы к истиранию. Изделия из этой стали могут подвергаться поверхностной закалке, что увеличивает их прочность. Твердость стали C45 после закалки достигает значений до *HRC 50-60*.

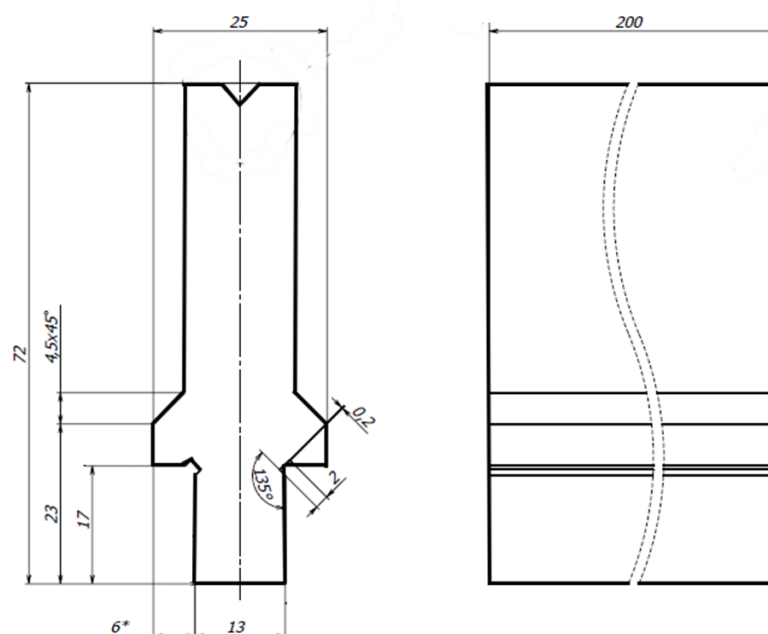
Материал пуансона иностранного производителя заменен отечественной высоколегированной инструментальной сталью X12M, имеющей аналогичную твердость 58...62 *HRC* [133].



$R = 0,6 \text{ мм}; L = 200 \text{ мм};$

ЛИСТ ПН-42 ГОСТ 19903-2015/Х12М ГОСТ 19281-2014.

Рисунок 4.8 – Пуансон 120 88



$R = 1,0 \text{ мм}; H = 55 \text{ мм}; L = 200 \text{ мм};$

ЛИСТ ПН-26 ГОСТ 19903-2015/У8А ГОСТ 19281-2014.

Рисунок 4.9 – Матрица V6 86

Сталь X12M часто применяется для изготовления пуансонов и других инструментов, работающих при высоких нагрузках и требующих повышенной прочности и твердости. Сталь X12M обладает высокой прочностью, что позволяет пуансону выдерживать значительные механические нагрузки без деформации или разрушения. Материал хорошо откликается на термическую обработку и может быть закалено до достаточно высокого уровня твердости. Это позволяет пуансону сохранять свою форму и избегать износа при контакте с листовым металлом.

Благодаря высокой твердости и прочности, материал X12M обладает хорошей износостойкостью, что позволяет пуансону длительное время сохранять свои механические свойства и эффективно выполнять свою функцию. Хромомолибденовая сталь имеет хорошую стойкость к коррозии, что особенно важно для пуансона, так как он подвергается воздействию окружающей среды, включая влагу и химические вещества.

Исходя из анализа требований к пуансону на гибочном прессе и рассмотрения характеристик материала X12M, можно сделать вывод о его пригодности для данного применения. Материал X12M обладает высокой прочностью, твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью, что позволяет ему эффективно выполнять функцию пуансона и обеспечивать долговечность и безопасность процесса гибки металла. Кроме того, доступность и возможность термической обработки делают X12M привлекательным выбором для производителей гибочных прессов.

Материал матрицы иностранного производителя заменен отечественной инструментальной нелегированной сталью У8А, имеющим аналогичную твердость *HRC* 52...56 [134].

Выбор стали У8А для производства матрицы для гибочного пресса можно обосновать тем, что она обладает хорошей прочностью, твердостью и износостойкостью. Это важные характеристики для матрицы гибочного пресса, которая подвергается значительным механическим нагрузкам и трению. Данная сталь хорошо обрабатывается резанием, что позволяет производить качественные

и точные матрицы с минимальными деформациями и ошибками. Положительным качеством является доступность и стоимость; кроме того, стоимость стали У8А обычно является относительно низкой по сравнению с некоторыми другими типами сталей, что может быть важным фактором при бюджетировании проекта.

Благодаря своему химическому составу сталь У8А имеет хорошую коррозионную стойкость. Это важно, так как матрица гибочного пресса может подвергаться воздействию влаги, жидкостей или агрессивных сред. Устойчивость к коррозии помогает продлить срок службы матрицы и сохранить ее работоспособность.

Используя полученные данные, был разработан технологический процесс изготовления пуансонов и матриц, включая операции фрезерования, закалки ТВЧ и шлифовку рабочих поверхностей.

Опытно промышленные испытания изготовленного гибочного инструмента показали, что его эксплуатационная стойкость практически не отличается от импортных аналогов, а их стоимость на 15-20% ниже стоимости ранее закупленных пуансонов и матриц, возможность поставки которых от ведущих зарубежных фирм в настоящее время из-за санкций исключена. Предложенный подход может быть использован при реинжиниринге различного технологического инструмента обработки металлов давлением.

Выводы по главе 4

1. Рассмотрены вопросы изготовления тонкостенных корпусов небольших устройств мелкосерийного или единичного производства с использованием принципов прототипирования. С учетом требований, предъявляемых к качеству корпусов, выбрана технология ступенчатой (пошаговой) гибки, в которой используется множество последовательных V-образных изгибов для получения большого радиуса заготовки. В ходе работы изготовлены корпуса устройства с применением технологии ступенчатой гибки и гибки с использованием традиционной оснастки, при этом заданный радиус выдерживался

в обоих случаях. Показано, что способ ступенчатой гибки больше подходит для единичного производства, имеет широкую универсальность, не требует применения дополнительного оборудования и оснастки помимо самого листогибочного пресса. Приведен пример практического применения данной технологии.

2. Рассмотрены вопросы изготовления тонкостенных деталей с дугообразными элементами аппаратов и приборов мелкосерийного или единичного производства с применением технологии ступенчатой (пошаговой) гибки, в которой используется множество последовательных V - образных изгибов для получения заданного радиуса заготовки. С применением этой технологии изготовлены различные тонкостенные детали прототипа универсального плазменного низкотемпературного стерилизатора серии Пластер Мед ТеКо. Практическое применение данной технологии рассмотрена на примере получения дугообразного сегмента бампера двери стерилизатора.

3. Рассмотрены вопросы импортозамещения рабочего инструмента зарубежных листогибочных прессов методом обратного инжиниринга (реверс-инжиниринга) на примере листогибочного пресса *Coastone cone 900*, установленного на предприятии ООО «ИВКОНСТРУКТИВ». Основной причиной выхода из строя является деформация рабочих кромок инструмента, который не подлежит восстановлению, и поэтому единственный выход – это его замена. Сложность изготовления рабочего инструмента состоит в отсутствии конструкторской документации на пуансоны и матрицы, что вынуждает прибегать к самостоятельному ее созданию путем обратного инжиниринга, который включает в себя технологию создания модели изделия путем прямых измерений. Для создания цифровых моделей применено лазерное 3D-сканирование, на основе которого разработаны рабочие чертежи пуансона и матрицы, а также технология их изготовления. Опытно-промышленные испытания изготовленного гибочного инструмента показали, что его эксплуатационная стойкость практически не отличается от импортных аналогов. Исходя из анализа требований к пуансону на

гибочном прессе и характеристик материала X12M, можно сделать вывод о его пригодности для данного применения. Материал X12M обладает высокой прочностью, твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью, что позволяет ему эффективно выполнять функцию пуансона и обеспечивать долговечность и безопасность процесса гибки металла. Материал матрицы иностранного производителя заменен отечественной инструментальной нелегированной сталью У8А, имеющей аналогичную твердость. Опытные промышленные испытания изготовленного гибочного инструмента показали, что его эксплуатационная стойкость практически не отличается от импортных аналогов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа современных процессов холодной листовой штамповки выявлены основные требования и ограничения, которые позволили обосновать применение ступенчатой листовой гибки с использованием V — образной матрицы и пуансонов различной конфигурации, также были определены основные отечественные материалы, используемые для изготовления рабочего инструмента (42CrMo, У8А, Х12М). Показана необходимость разработки методики расчета и определения геометрии пуансонов. Обоснована перспективность обработки рабочего инструмента путем лазерного упрочнения с целью повышения эксплуатационных свойств.

2. В результате проведенной работы разработана методика по определению технологических параметров ступенчатой гибки. Установлена зависимость угла гибки ступени от относительного хода (глубины проникновения в матрицу) пуансона при свободной гибке, которая использована при определении параметров ступенчатой гибки для производства ряда тонкостенных корпусных деталей. Получено выражение для определения радиуса наконечника пуансона, не приводящего к смятию контактной поверхности заготовки в процессе гибки; оно использовано при разработке технологий ступенчатой гибки тонколистового металла, выполненного из малоуглеродистой и нержавеющей сталей.

3. Предложена модель стойкости лазерно - упрочненного штампового инструмента, которая использована для разработки и оптимизация режимов лазерной закалки без оплавления поверхности технологического инструмента ступенчатой гибки с целью повышения его усталостной прочности и в целом эксплуатационных характеристик.

4. Результаты экспериментальных исследований по влиянию лазерного излучения на глубину закаленного слоя штампов, изготовленных из углеродистой и легированных инструментальных сталей У8, 40ХН2МА, 5ХВ2С, 9ХС и Х12М позволили осуществить импортозамещение рабочего инструмента. Впервые, после математической обработки результатов экспериментального исследования

лазерного поверхностного упрочнения образцов из инструментальной стали X12M и конструкционной легированной стали 40XH2MA, предложены выражения для оценки размеров лазерно-упрочненного слоя при термической обработке без оплавления поверхности

5. Результаты работы используются в промышленности и учебном процессе:

- разработана и успешно опробована на практике методика расчета технологических параметров ступенчатой гибки тонколистовых стальных деталей корпусов ряда изделий индивидуального и мелкосерийного производства, что позволило сократить время на их прототипирование и снизить производственные затраты;

- результаты экспериментального исследования лазерного поверхностного упрочнения образцов из инструментальной стали У8, 40XH2MA, 5XB2C, 9XC и X12M позволили решить вопросы импортозамещения рабочего инструмента зарубежных листогибочных прессов методом обратного инжиниринга (реверс-инжиниринга) и повысить ресурс работы рабочего инструмента на примере листогибочного пресса Coastone cone 900 установленного на предприятии ООО «ИВКОНСТРУКТИВ»;

- в НИТУ МИСИС при проведении учебных занятий со студентами по направлениям подготовки 15.03.02 и 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» по дисциплинам «Обратный инжиниринг деталей машин и элементов конструкции» и «Инжиниринг оборудования для обработки металлов давлением».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1968. – 283 с.
2. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология листовой штамповки: Учебник. – М.: Машиностроение, 1980. – 304 с.
3. Бурдуковский В.Г. Технология листовой штамповки: учеб. пособие. – Екатеринбург: изд-во УрФУ, 2019. – 224 с.
4. Яковлев С.С. Ковка и штамповка. В 4-х т. Т. 4. Листовая штамповка. – М.: Машиностроение, 2010. – 732 с.
5. Константинов И.Л., Сидельников С.Б. Кузнечно-штамповочное производство: учебник. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2021. – 464 с.
6. Lenard J.G. (Ed.). Metal forming science and practice. – Oxford: Elsevier Science, 2002. – 378 p.
7. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – Л.: Машиностроение. Ленинградской отделение. - 1979, 520 с.
8. Hu J., Marciniak Z., Duncan J. Mechanics of sheet metal forming. – Oxford – Boston: Butterworth-Heinemann, 2002. – 211 p.
9. ГОСТ 18970-84. Обработка металлов давлением. Операции ковки и штамповки. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 35 с.
10. Лысов М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. – М.: Машиностроение, 1966. – 236 с.
11. Мошнин Е.Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей. – М.: Машиностроение, 1973. – 240 с.
12. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка / Под общ. Ред. Л.И. Рудмана. – М.: Машиностроение, 1988. – 496 с.
13. Benson S. Bending Basics. – Cincinnati: Fabricators & Manufacturers Association, 2017. - 581 pp.
14. Ковка и штамповка. В 4-х т. Т. 4. Листовая штамповка / Под ред. А.Д. Матвеева; ред. совет Е.И, Семенов и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 544 с.

15. Metal forming handbook / Schuler. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hong Kong; London; Milan; Paris; Santa Clara; Singapore; Tokyo: Springer, 1998. - 573 p.
16. Мошнин Е.Н. Гибка, обтяжка и правка на прессах. – М.: Машгиз, 1950. – 360 с.
17. Основы гибки на листогибочном прессе: Полное руководство <https://www.machinemfg.com/ru/press-brake-bending-basics/> (дата обращения 20.08.2025 г.).
18. Гибка металла: определение, оборудование и технологии. <https://www.machinemfg.com/ru/press-brake/> (дата обращения 20.08.2025 г.).
19. Листогибочные станки / https://www.energostan.ru/stanki/gibochnye_stanki_listogiby/ (дата обращения 20.08.2025 г.)
20. Листогибочные станки / <https://leadermash.ru/product/metalloobrabotka/listogibochnye-pressy/?ysclid=mdoax6aokq397395526> (дата обращения 20.08.2025 г.)
21. Гибка металла. Разновидности и конструкция гибочных станков / <https://sterbrust.tech/tehnologii/gibka-metalla.html> (дата обращения 20.08.2025 г.).
22. Листогибочное оборудование: виды и особенности / <https://ryVok.ru/article/listogibochnoe-oborudovanie-vidy-i-osobennosti/?ysclid=mdoaqswoob445316889> (дата обращения 20.08.2025 г.).
23. Листогибочные прессы / https://www.energostan.ru/stanki/listogibochnye_pressy/ (дата обращения 20.08.2025 г.).
24. AD-R Press Brakes SERIES / https://www.durmazlar.com.tr/wp-content/uploads/2022/03/AD-R_EN-1.pdf (дата обращения 20.08.2025 г.).
25. Листогибочные прессы ЕКО ЕНС® / <https://barus.tools/catalog/machines/listogiby/> (дата обращения 20.08.2025 г.)
26. Бойко А.Ю. Технология листовой штамповки: Учеб. пособие. - Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2004. 256 с.

27. Беляев В.А. Холодная листовая штамповка: учебное пособие. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2008. – 128 с..
28. Banabic D. (Ed.). Multiscale modeling in sheet metal forming. – Heidelberg: Springer, 2016. – 405 p.
29. Shane Z. Bump Bending for Large Bend Radius in Sheet Metal. <https://www.machinemfg.com/bump-bending/> (дата обращения 20.08.2025 г.).
30. Штампы для гибочных прессов / <https://www.machinemfg.com/press-brake-dies-guide>. (дата обращения 20.08.2025 г.).
31. Инструмент гибочный / <https://barus.tools/tech-info/instrument-gibochnyy/> (дата обращения 20.08.2025 г.).
32. Press brake tools / https://www.conic.co.jp/en/tech/press_brake/Vol1.html (дата обращения 20.08.2025 г.).
33. Инструмент AMADA PROMECAM. https://prompart.com/catalog/gibochnyy_instrument/instrument_amada_promecam/ (дата обращения 20.08.2025 г.).
34. Гибочный инструмент для листогибочных прессов системы Trumpf-WILA. <https://www.metal-tool.ru/ukb/gibochnyj-instrument-trumpf-wila.htm>. (дата обращения 20.08.2025 г.).
35. Гибочный инструмент для листогибочных прессов системы Beyeler-Bystronic. <https://www.metal-tool.ru/ukb/gibochnyj-instrument-beyeler-bystronic.htm> (Дата обращения 20.08.2025 г.).
36. Гибочный инструмент / <https://www.barus.tools/catalog/bendingtools/?ysclid=mdonr17q1k771457143>. (дата обращения 20.08.2025 г.).
37. Зубцов М.Е. Листовая штамповка: Учебник. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1980. – 432 с.
38. Heston T. Precision Sheet Metal Bending, Bump by Bump. <https://www.canadianmetalworking.com/canadianindustrialmachinery/article/fabricating/precision-sheet-metal-bending-bump-by-bump> (дата обращения 20.08.2025 г.).

39. Step Bending Large Radii. <http://sheetmetal.me/tooling-terminology/step-bending/> (Дата обращения 20.08.2025 г.).
40. VorkoV V., Aerens R., Vandepitte D., Duflou J. Influence of a single bend in the bumping process of large radius air bending // Key Engineering Materials Vols 651-653 (2015) pp 1090-1095.
41. Step Bends. <https://www.protocase.com/resources/bends/step-bends.php> (Дата обращения 20.08.2025 г.).
42. Чиченев Н. А., Карфидов А. О., Васильев М. В., Чиченева О. Н. Определение параметров ступенчатой гибки тонколистового металла // Черные металлы. 2024. №1. С. 17-20.
43. ГОСТ 25346-2013. Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. – М.: Стандартинформ, 2019. – 41 с.
44. Srinivasan R., Vasudevan D., Padmanabhan P. Prediction of bend force and bend angle in air bending of electrogalvanized steel using response surface methodology // Journal of Mechanical Science and Technology. 27 (7) (2013) 2093~2105.
45. Aerens R., VorkoV V., Duflou J. Physics of large radius air bending // Procedia Manufacturing 29 (2019) 161–168.
46. Карфидов А.О., Чиченев Н.А., Васильев М.В., Чиченева О.Н. Определение хода пуансона при ступенчатой гибке тонколистового металла // Сталь. 2025. №7. С. 27-29.
47. ГОСТ IEC 60670-1-2016. Кожухи и оболочки для принадлежностей бытовых и аналогичных стационарных электрических установок. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2017. – 49 с.
48. Чиченев Н. А., Васильев М. В., Карфидов А. О. Применение ступенчатой гибки для изготовления тонкостенных корпусных деталей // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы

докладов 81-й международной научно-технической конференции. - Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2023. Т.1. с.209.

49. Чиченев Н. А., Карфидов А. О., Васильев М. В., Чиченева О. Н. Ступенчатая гибка листового металла при изготовлении тонкостенных корпусных деталей // Сталь. 2023. №7. С. 23-25.

50. Карфидов А.О., Чиченев Н.А., Васильев М.В., Чиченева О.Н. Применение ступенчатой гибки для прототипирования дугообразных элементов тонколистовых деталей // Современные технологии и реверс-инжиниринг: сб. статей Всероссийской научно-практической конференции. -Севастополь: ФГАОУ ВО «СГУ», 2025. – 103-105 с.

51. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.

52. Харламов С.В. Конструирование технологических машин и аппаратов. - Л.: Издательство Ленинградского университета, 1974. — 274 с.

53. Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин: учебник. — М.: Высшая школа, 2008 — 408 с.

54. Горский А. И. Определение допускаемых напряжений при расчетах на прочность / А. И. Горский, Е. Б. Иванов-Эмин, А. И. Кореновский. – М.: НИИМАШ, 1974. – 79 с.

55. Матлин М. М., Казанкин В. А., Казанкина Е. Н. Неразрушающая методика определения допускаемых напряжений смятия сталей // Известия ВолгГТУ. 2021. №4 251). С. 60–63.

56. Контактные напряжения цилиндрических тел.
<https://kataltim.ru/kontakt/konta.php?ysclid=lsVgn51eye841465370> (дата обращения 17.08.2025 г.).

57. Контактные напряжения цилиндрических тел.
<https://reductory.ru/literatura/detali-mashin-ivanov/-8-3--kontaktnyue-napryajeniya-i-kontaktnaya-prochnost/?ysclid=lto2t3l08a677642773> (дата обращения 17.08.2025 г.).

58. Карфидов А. О., Чиченев Н. А., Васильев М. И., Чиченева О. Н., Кобелев О.А. Определение радиуса наконечника пуансона при воздушной гибке листового металла // Черные металлы- 2025. №8. С.54-57.

59. Карфидов А. О., Чиченев Н. А., Горбатюк С. М., Чиченева О. Н., Кобелев О. А. Выбор радиуса пуансона при воздушной гибке листового металла с целью предотвращения смятия контактной поверхности // Metallurg, 2025. №10. С.

60. Марочник стали и сплавов. <http://www.splav-kharkov.com/main.php> (дата обращения 17.05.2025 г.).

61. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки: Уч. пособие. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. - 663 с.

62. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В. Я. Панченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 664 с.

63. Чиченев Н. А., Иванов С. А., Горбатюк С. М., Веремеевич А. Н. Лазерное упрочнение технологического инструмента обработки металлов давлением: монография. – мб Изд. Дом МИСиС, 2013. – 1656 с.

64. Bahrami Balajaddeh, M., Naffakh-Moosavy, H. Pulsed Nd:YAG laser welding of 17-4 PH stainless steel: Microstructure, mechanical properties, and weldability investigation (2019) Optics and Laser Technology, 119, article № 105651, DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105651

65. Khorram, A., Davoodi Jamaloei, A., Jafari, A., Moradi, M. Nd:YAG laser surface hardening of AISI 431 stainless steel; mechanical and metallurgical investigation (2019) Optics and Laser Technology, 119, Article № 105617, DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105617

66. Moradi, M., Arabi, H., Karami Moghadam, M., Benyounis, K.Y. Enhancement of surface hardness and metallurgical properties of AISI 410 by laser

hardening process; diode and Nd:YAG lasers (2019) *Optik*, 188, pp. 277-286. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.05.057.

67. Sarkar, S., Kumar, C.S., Nath, A.K. Effects of heat treatment and build orientations on the fatigue life of selective laser melted 15-5 PH stainless steel. // *Materials Science and Engineering A*, Volume 755, May 2019, pp. 235-245. DOI: 10.1016/j.msea.2019.04.003.

68. Moradi, M., Arabi, H., Jamshidi Nasab, S., Benyounis, K.Y. A comparative study of laser surface hardening of AISI 410 and 420 martensitic stainless steels by using diode laser (2019) *Optics and Laser Technology*, 111, pp. 347-357. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.10.013

69. Hsu T.H., Chang Y.J., Huang C.Y., Yen H.W., Chen C.P., Jen K.K., Yeh A.C. Microstructure and property of a selective laser melting process induced oxide dispersion (2019) *Journal of Alloys and Compounds*, 803, pp. 30-41. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.289

70. Bahrami Balajaddeh, M., Naffakh-Moosavy, H. Pulsed Nd:YAG laser welding of 17-4 PH stainless steel: Microstructure, mechanical properties, and weldability investigation (2019) *Optics and Laser Technology*, 119, article № 105651, DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105651.

71. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 207 с.

72. Чиченев Н. А., Карфидов А. О., Чиченева О. Н., Пашков А. Н., Горювая Т. Ю. Технологические факторы лазерного упрочнения валков многовалковых станов // *Металлург*. 2022. № 12. С. 1-10.

73. Седов Л.И. Методы подобия и размерностей в механике. – М.: Наука, 1965. – 388 с..

74. Chichenev N. A., Gorbatyuk S. M., Naumova M. G.; Morozova I. G. Using the similarity theory to describe laser hardening processes. // *CIS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 19. pp. 44–47.

75. Чижиков Ю.М. Теория подобия и моделирование процессов обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1970. – 296 с.
76. Sim A., Park C., Kang N., Kim Y., Chun E.-J. Effect of laser-assisted nitriding with a high-power diode laser on surface hardening of aluminum-containing martensitic steel (2019) Optics and Laser Technology, 116, pp. 305-314. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.03.040
77. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: Справочник: В 3-х томах / под ред. А.Г. Рахштадта, Л.М. Капуткиной, С.Д. Прокошкина – М.: Интермет Инжиниринг. – Том 1: Металловедение и термическая обработка стали и чугуна, 2005. - 647 с.; Том 2: Строение стали и чугуна, 2005. - 528 с.; Том 3: Термическая и термомеханическая обработка стали и чугуна. 2007. – 920 с.
78. Металловедение: Учебник. В 2-х т. / И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, К.К. Портной и др. - М.: Издательский дом «МИСиС», 2009. – Том 1: 496 с.; Том 2: 528 с.
79. Коваленко В.С., Головка Л.Ф., Черненко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. – Киев: Техника, 1990. – 190 с.
80. Courtney C., Steen W. The surface heat treatment of En 8 steel using a 2 kW CO₂-laser / Advances in Surface Coating Technology. Int. Conf. London. 1978. Vol. 1. Pp. 219-232.
81. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1989. - 300 с.
82. Медведев П.В., Федотов В.А. Математическое планирование эксперимента: учебное пособие. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 97 с.
83. Юдин Ю.В. Майсурадзе М.В., Водолазский Ф.В. Организация и математическое планирование эксперимента: учебное пособие. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 124 с.
84. Смагунова А.Н., Белых Л.И., Пашкова Г.В. Математическое планирование эксперимента в методических исследованиях аналитической химии. Учебное пособие для вузов. – М.: Издательство Лань, 2018. – 120 с.

85. Chichenev N. A., Chicheneva O. N., Karfidov A. O., Pashkov A. N. Selection of laser processing parameters for hot stamping tools based on mathematical planning of the experiment // CIS Iron & Steel ReView. Vol. 22 (2021), pp. 37–40. DOI: 10.17580/cisisr.2021.02.07.
86. Таблицы планов экспериментов для факторных и полиномиальных моделей: справочное пособие / В.В. Бродский, Л.И. Бродский, Г.И. Голакова и др. – М.: Металлургия, 1982. – 752 с.
87. Scheffer E. Einfuhrung in di Praxis der Statistischen versuchsplanung. – Leipzig, VEB Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie. – 1984, 440 pp.
88. Надежность и долговечность валков холодной прокатки / В. П. Полухин [и др.]. – М.: Металлургия, 1976. – 448 с.
89. Васильев Д.И., Тылкин М.А., Тетерин Г.П. Основы проектирования деформирующего инструмента. - М.: Высшая школа, 1980. - 223 с.
90. Jiang Z. Y., Wei D., Tieu A. K. Analysis of cold rolling of ultra-thin strip // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209, no. 9, pp. 4584–4589.
91. Nefedov A.V., Svichkar V.V., Chicheneva O.N. Re-engineering of Equipment to Feed the Melting Furnace with Aluminum Charge (2021) Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 1198-1204. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_139
92. Вендт П. Консервация ресурсов в процессах термической обработки — при подогреве, охлаждении и закалке // Черные металлы. 2016 №5 с. 54-57
93. Горбатюк С.М., Морозова И.Г., Наумова М.Г. Разработка рабочей модели процесса реиндустриализации производства термической обработки штамповых сталей // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 5. С. 410–415.
94. Чиченев Н.А., Карфидов А.О., Васильев М.В., Чиченева О.Н. Лазерная закалки технологического инструмента обработки металлов давлением // Черные металлы- 2024. №11. С.81-85. DOI: 10.17580/chm.2024.11.14
95. ГОСТ 4543-71. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2008. – 41 с.

96. Марочник стали и сплавов. Характеристика материала 40ХН2МА. http://splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=191 (дата обращения 05.09.2025 г.)
97. ООО «Европейская металлургическая компания». Характеристики низколегированной стали AISI 4340. https://emk24.ru/wiki/astm_steels/stal_aisi_4340_7211143/ (дата обращения 05.09.2025 г.)
98. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 207 с.
99. Стенико А., Тами В. Совершенствование процесса прямой закалки на заводе компании Nucor Tuscaloosa. // Черные металлы. 2018 № 12 с. 41-43.
100. Характеристика материала 12ХМ: Марочник стали и сплавов. http://splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=52 (дата обращения 08.08.2025 г.)
101. Longo S.G. Principles and Applications of Dimensional Analysis and Similarity. - Parma, Italy: University of Parma, 2022. – 428 pp.
102. Макаричев Ю. А., Иванников Ю. Н. Методы планирование эксперимента и обработки данных: учебное пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.
103. Chichenev N. A., Gorbatyuk S. M., Karfidov A. O., Chicheneva O. N.. Experimental study of the process of laser treatment of steel Kh12M // CIS Iron and Steel Review — Vol. 27 (2024), pp. 103–110. DOI: 10.17580/cisisr.2024.01.16.
104. Горбатюк С. М., Карфидов А. О., Наговицын В. А., Чиченева О. Н., Бабали Э. Э. Влияние лазерного излучения на глубину закаленного слоя вырубных штампов из инструментальных сталей // Металлург. 2023. № 7. С. 115-118
105. Лысов М. И., Сосов Н. В. Формообразование деталей гибкой. – М.: Машиностроение, 2001. - 388 с.
106. Shinkin V. N., Kolikov A. P. Elastoplastic shaping of metal in an edge-bending press in the manufacture of large-diameter pipe // Steel in Translation. 2011. Vol. 41. No. 6. P. 528 – 531.

107. Mentyukov K. Yu., Bortsov A. N., Shabalov I. P., Mansyrev E. I. Study of the properties of the base metal of large-diameter pipes under alternating loading // Metallurgist. 2016. Vol. 60. No. 3 – 4. P. 397 – 404.

108. Васильев М.В., Карфидов А.О., Свинарев М.Д., Чиченев Н.А. Прототипирование технологии пошаговой гибки тонкостенных корпусов // Сталь. 2022. №7. С. 27-29.

109. Карфидов А.О., Чиченев Н.А., Васильев М.В., Чиченева О.Н. Прототипирование ступенчатой гибки листового металла для изготовления тонкостенных корпусов. - Современные технологии и реверс-инжиниринг: сб. статей Всероссийской научно-практической конференции. - Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2023. – с. 220-222.

110. Варфел Т. З. Прототипирование. Практическое Руководство. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013. – 240 с.

111. Proflasermet – лазерная резка, гибка металла. Контактная информация. URL: <https://proflasermet.ru/contacts/> (дата обращения 25.08.2025)

112. ЕНТ ProfiPress 130-30 Листогибочный пресс с ЧПУ <https://mashinform.ru/import/kpo/eht-profiPress-130-30-obj2649.html?ysclid=mdwsafktbm509941395> (дата обращения 25.08.2025)

113. Basementlab – лазерная резка, гибка металла. Контактная информация. Basementlab URL: https://vk.com/basementlab_metal/ (дата обращения 25.08.2025)

114. Гибочный пресс Durma AD-R, технические характеристики URL: https://durma.ru/produkcija/pressy/ad-r_seriya/ (дата обращения 25.08.2025).

115. Салманов А.Г., Вернер О.М. Стерилизация изделий медицинского назначения. Харьков: ФОП Панов А.М.; 2015:412.

116. Card A.J., Ward J., Clarkson P.J. Successful risk assessment may not always lead to successful risk control: A systematic literature review of risk control after root cause analysis. Journal of Healthcare Risk Management. 2012;31(3):6-12. <https://doi.org/10.1002/jhrm.20090>

117. Di Pietrantonj C., Ferrara L., Lomolino G. Multicenter study of the prevalence of nosocomial infections in Italian hospitals. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 2004, 25:8 5 - 87.

118. Johna S., Tang T., Saidy M. Patient safety in surgical residency: Root cause analysis and the surgical morbidity and mortality conference - case series from clinical practice. *The Permanente Journal*. 2012;16(1):67-69. <https://doi.org/10.7812/TPP/11-097>

119. Satahira K., Nakasone K. Sterilization effects of HO₂/O₂- radicals produced by H₂O-O₂ plasma. *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 2016;29(3):433-438. <https://doi.org/10.2494/photopolymer.29.433>

120. Usta E.O., Ayaz F. Gas plasma hydrogen peroxide (H₂O₂) sterilization. 3rd *Advanced Engineering Days*. 2012; 3:54-56.

121. Sarangapani C., Patange A., Bourke P., Keener K., Cullen P. Recent advances in the application of cold plasma technology in foods. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2018;9:609-629. <https://doi.org/10.1146/annureV-food-030117-012517>

122. Карфидов А. О., Чиченев Н. А., Васильев М. И., Чиченева О. Н. Изготовление дуговых листовых элементов методом ступенчатой гибки // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(3):233–238. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-233-238>.

123. Карфидов А.О., Чиченев Н.А., Васильев М.В., Чиченева О.Н. Применение ступенчатой гибки для прототипирования дугообразных элементов тонколистовых деталей // *Современные технологии и реверс-инжиниринг: сб. статей Всероссийской научно-практической конференции. -Севастополь: ФГАОУ ВО «СГУ», 2025. – 103-105 с.*

124. Низкотемпературный стерилизатор Пластер Прайм Мед ТеКо <https://medteco.ru/product/sterilizatsiya/plazmennye-sterilizatory/plaster-praym/> (дата обращения 12.12.2024 г.).


125. Чиченев Н. А., Карфидов А. О., Васильев М. В., Чиченева О. Н. Определение параметров ступенчатой гибки тонколистового металла // Черные металлы. 2024. №1. С. 17-20.
126. Самусев С. В., Фадеев В. А., Сидорова Т. Ю. Разработка эффективных калибровок формовки листовой заготовки для производства прямошовных электросварных труб малого и среднего диаметров // Metallurg. 2020. № 7. С. 55 – 57.
127. Efremov D. B., Gerasimova A. A., Gorbatyuk S. M., Chichenev N. A. Study of kinematics of elastic-plastic deformation for hollow steel shapes used in energy absorption devices // CIS Iron & Steel ReView. 2019. Vol. 18. P. 30–34.
128. Гневашев Д. А., Оруджев Ш. Ф. Исследование процесса гибки длинномерных листовых изделий с подбором прижимов на основе компьютерного моделирования // Черные металлы. 2023. №11. С. 47-52.
129. ООО «НПО Промет». <https://www.safe.ru/> (дата обращения 31.08.2025).
130. Parrott A., Warshaw L. Industry 4.0 and the digital twin: Deloitte Uni Varsity Press, 2017, 18 pp.
131. Петров М. А. Применение технологий 3D-сканирования в заготовительной и машиностроительной практике // РИТМ машиностроения. 2020, № 4, с. 32-41.
132. Инструмент гибочный BARUS. <https://barus.tools/tech-info/instrument-gibochnyy/> (дата обращения 02.09.2025).
133. Сталь марки X12M. https://metallischekiy-portal.ru/marki_metalloV/sti/X12M (дата обращения 25.08.2025).
134. Марка стали У8А инструментальная. https://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/sti/U8A (дата обращения 25.08.2025).
135. Карфидов А.О., Кобелев О.А., Чиченев Н.А., Чиченева О.Н., Морозов Ю.А., Соломонов К. Н. Выбор радиуса пуансона при воздушной гибке листового металла с целью предотвращения смятия контактной поверхности // Metallurg. 2025. № 10. С. 81-85.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

О ВНЕДРЕНИИ НА ПРЕДПРИЯТИИ ООО «ИВКОНСТРУКТИВ» РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор ООО
«ИВКОНСТРУКТИВ»



(подпись) И.М. Соловьев
«24» сентября 2025 г

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации Карфидова Алексея Олеговича на тему: «Разработка методики расчета ступенчатой тонколистовой гибки и увеличение ресурса работы инструмента лазерным упрочнением с целью повышения эффективности процесса» при разработке конструкции рабочего инструмента листогибочного прессы Coastone Cone 900



Мы, нижеподписавшиеся начальник цеха Сидоров Дмитрий Александрович и директор производства Красильникянц Дмитрий Евгеньевич составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Карфидова Алексея Олеговича по теме: «Разработка методики расчета ступенчатой тонколистовой гибки и увеличение ресурса работы инструмента лазерным упрочнением с целью повышения эффективности процесса» имеют теоретическое и практическое значение для повышения эффективности процесса гибки тонкостенных изделий.

Результаты работы А.О. Карфидова использованы при проведении обратного инжиниринга (реверс-инжиниринга) с целью импортозамещения рабочего инструмента зарубежного листогибочного прессы Coastone Cone 900, установленного на предприятии ООО «ИВКОНСТРУКТИВ». Для создания цифровых моделей применено лазерное 3D-сканирование, на основе которого разработаны рабочие чертежи пуансона и матрицы, а также технология их изготовления. Опытно-промышленные испытания изготовленного гибочного инструмента показали, что его эксплуатационная стойкость практически не отличается от импортных аналогов при значительной экономии в стоимости.

Начальник цеха

Директор производства





(подпись) Сидоров Д.А.

(подпись) Красильникянц Д.Е.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
АКТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора института ЭкоТех

 П.В. Петровский

«___» _____ 2025 г

АКТ

Настоящий Акт составлен в том, что методика прототипирования технологии ступенчатой гибки и импортозамещение рабочего инструмента листогибочного пресса, созданные в рамках диссертационной работы Карфидова А.О. «Разработка методики расчета ступенчатой тонколистовой гибки и увеличение ресурса работы инструмента лазерным упрочнением с целью повышения эффективности процесса» используются в учебном процессе на кафедрах «Обработка металлов давлением» и «Инжиниринг технологического оборудования» НИТУ МИСИС. Методика прототипирования технологии и рабочего инструмента ступенчатой гибки методом обратного инжиниринга применяются при подготовке бакалавров по направлению 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» в дисциплине «Обратный инжиниринг деталей машин и элементов конструкций». Соответствующие материалы прошли проверку в учебном процессе 2023–2025 гг. и включены в план изданий НИТУ МИСИС на 2026 год.

Заведующий кафедрой ОМД

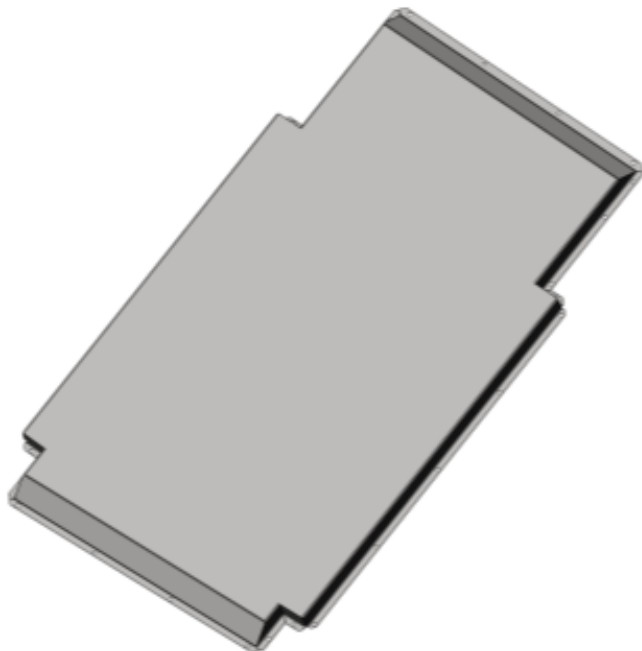
Ученый секретарь каф. ОМД

Научный руководитель

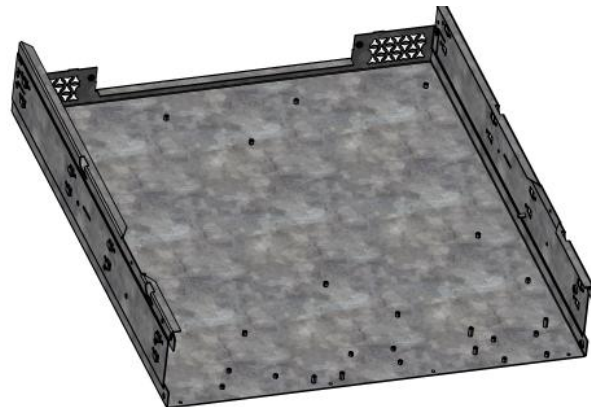
 А.С. Алещенко Т.Ю. Сидорова О.А. Кобелев

ПРИЛОЖЕНИЕ В
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ИЗДЕЛИЙ

Модель крышки



Модель корпуса



Модель короба

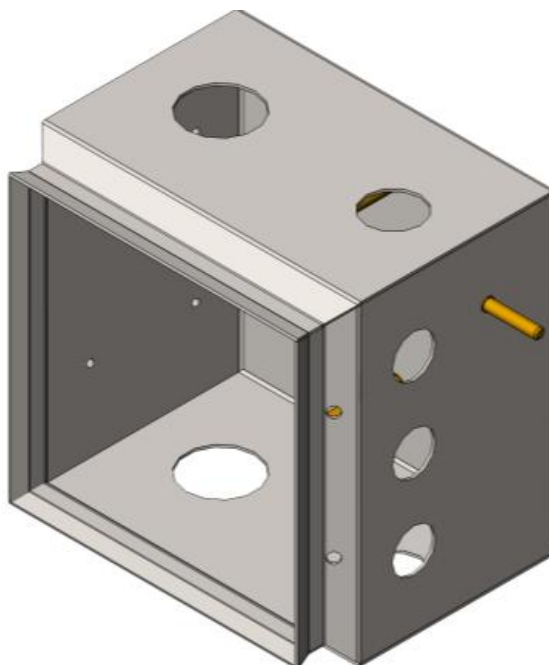


Рисунок В1 - 3D модели изделий

Рисунок В2 – Развертка детали крышка

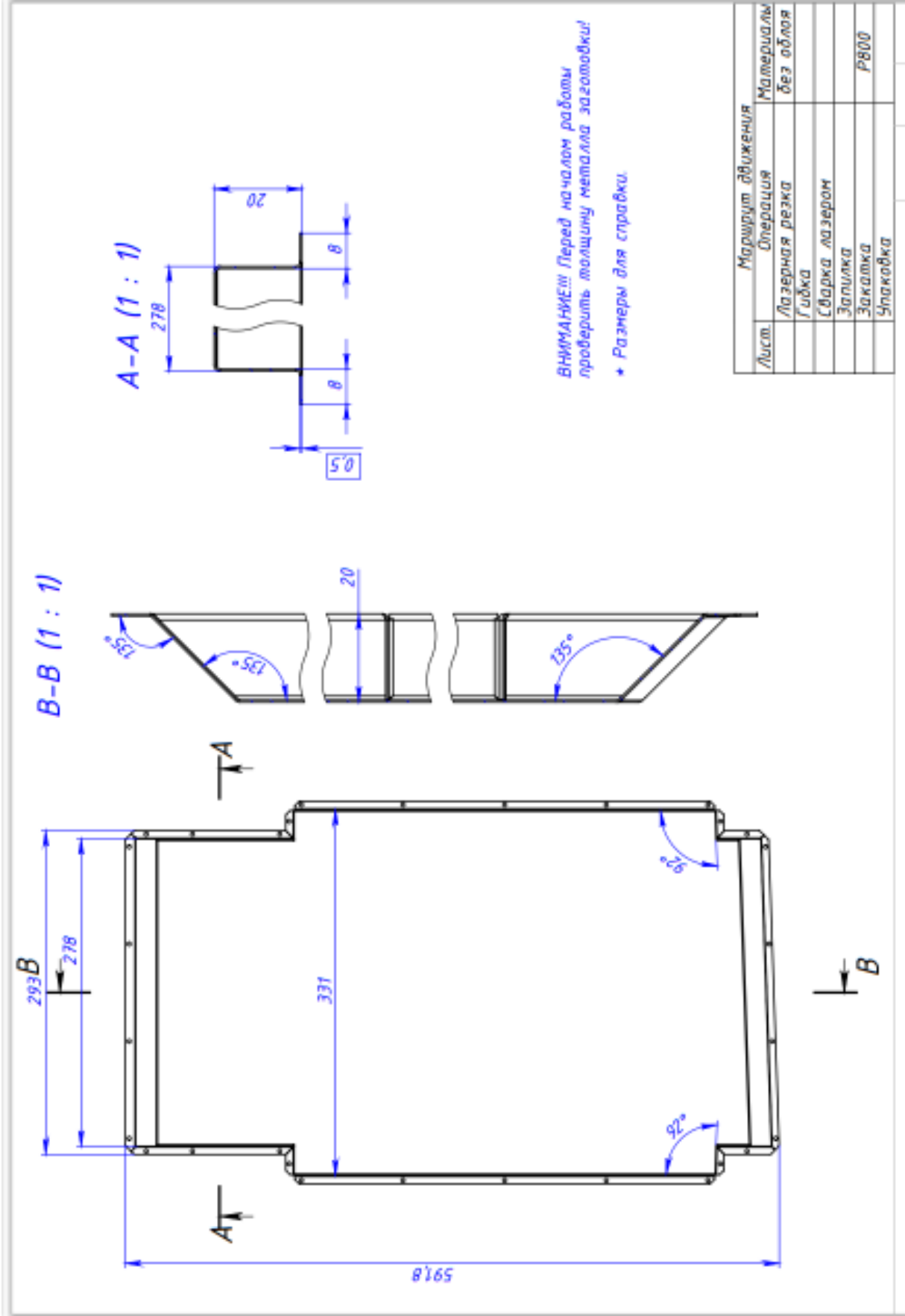
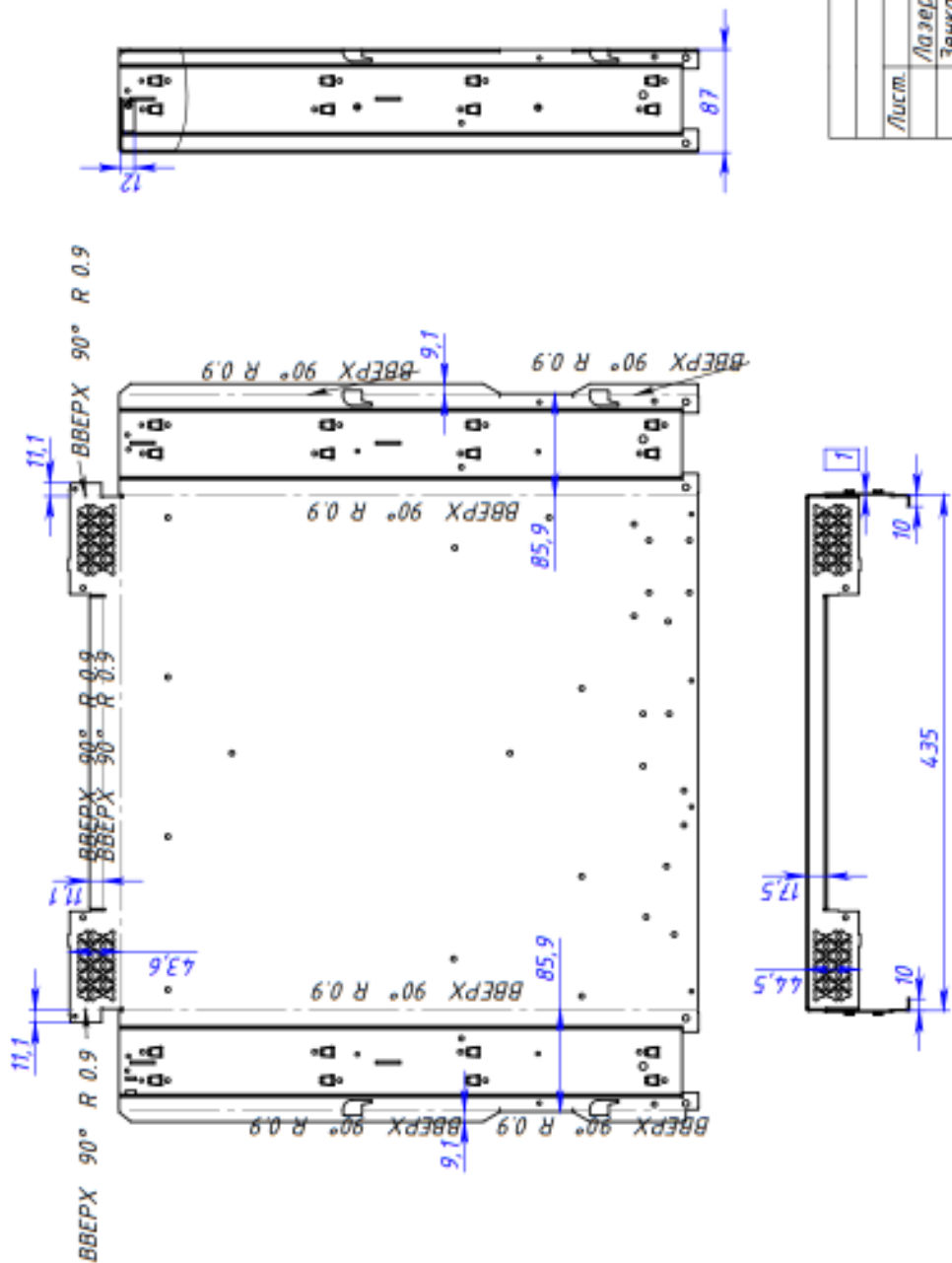


Рисунок В3 – Схема изготовления детали крышка

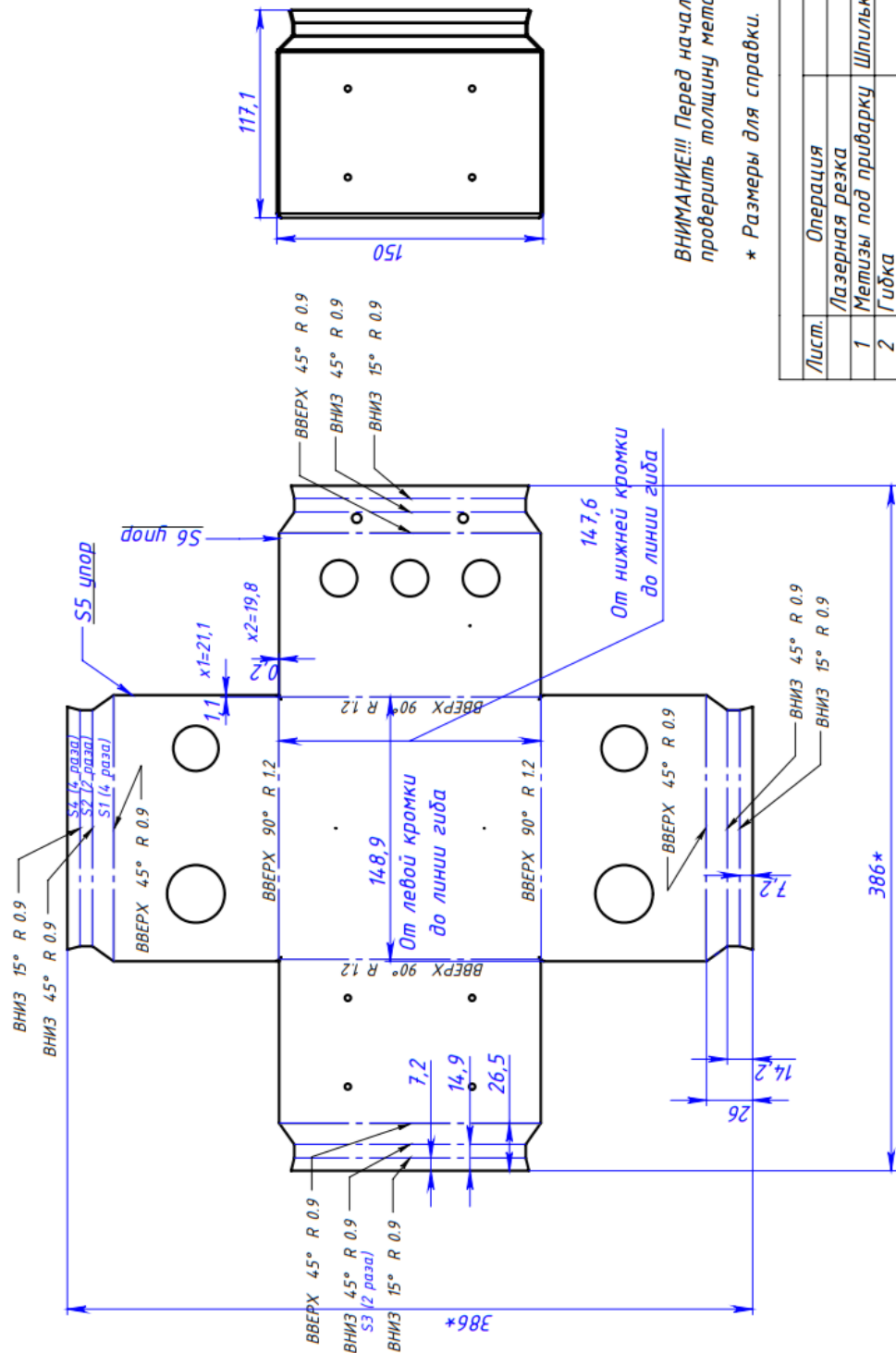


ВНИМАНИЕ!!! Перед началом работы проверить толщину металла заготовки!

* Размеры для справки.

Общая таблица		
Маршрут движения		
Лист	Операция	Материалы
	Лазерная резка	
	Зенковка	
	Снятие облоя	
	Гибка	
	Выдавка	
	Гибка	
	Метизы под запрессовку	
	Передавать на приклепку	
	Спецификация деталей	

Рисунок В5 – Схема изготовления детали корпус



ВНИМАНИЕ!!! Перед началом работы проверить толщину металла заготовки!

* Размеры для справки.

Лист.	Операция	Материалы
1	Лазерная резка	
2	Метизы под приварку	Шпилька CD-M6-12 - 1шт.
3	Гудка	
	Метизы под приварку	Шпилька CD-M6-35 - 2шт. Шпилька CD-M5-25 - 1шт.
	Передать сварку СО2	

Рисунок В6 – Схема изготовления изделия короб