

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

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»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Кобелев Олег Анатольевич

Москва – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, поиска и внедрения эффективных методов и средств производства.

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.

Часто детали сложного профиля из листового металла получают методом сварки из предварительно изогнутых деталей простого профиля, либо методом гибки с использованием специальной оснастки. Детали, изготовленные гибкой, по сравнению со сварными деталями, характеризуются более высоким качеством, поскольку отсутствуют дефекты, образующиеся в зоне термического влияния сварного изделия. Поэтому одним из наиболее распространенных способов получения тонкостенных металлических деталей является гибка, при которой в результате пластической деформации происходит образование или изменение углов между частями заготовки или приздание ей криволинейной формы с образованием развертывающихся поверхностей (цилиндрической или конической).

Одним из высокотехнологичных методов гибки листового металла является свободная гибка, особенностью которого является использование универсального инструмента для изготовления деталей различной геометрии. Это позволяет минимизировать количество необходимых инструментов, уменьшить себестоимость производства и производить большой ассортимент деталей с различным профилем. Поэтому исследование и применение технологических процессов гибки для производства тонкостенных металлических деталей остается актуальным на предприятиях различных отраслей экономики страны.

Основными направлениями развития гибки листового металла являются повышение качества деталей, точности размеров и снижение себестоимости готовой продукции. За счет этого, растет востребованность использования метода свободной гибки листового металла универсальным инструментом, для изготовления деталей различной формы. При этом для изготовления тонкостенных деталей дугообразными элементами достаточно успешно используется способ ступенчатой (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.

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 пuhanсона может существенно их уменьшить. 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. В некоторых источниках даются общие соображения о выборе радиуса наконечника пuhanсона, но отсутствуют конкретные зависимости по его выбору.

В настоящее время наиболее широко используемым материалом для производства листогибочных инструментов являются углеродистые и легированные 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.

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.

Задачи исследования.

1. Провести 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 применения лазерного упрочнения с целью повышения их эксплуатационной стойкости и повышения ресурса работы.

4. Провести экспериментальные исследования по влиянию лазерного излучения на глубину закаленного слоя штампов, изготовленных из углеродистой и легированных инструментальных сталей, и дать 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 основаны на теории обработки металлов давлением, теории и технологии холодной листовой штамповки. Теоретические исследования процессов деформирования базируются на классических положениях механики сплошной среды, теории упругости, теории пластического деформирования. Натурные эксперименты проведены с использованием гидравлического листогибочного пресса, экспериментальной гибочной оснастки и стандартных средств измерений с применением известных математических методов обработки опытных данных.

Научная новизна.

1. 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.

2. 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.

4. Впервые, после математической обработки результатов экспериментального исследования лазерного поверхностного упрочнения образцов из инструментальной стали X12M и конструкционной легированной стали 40ХН2МА, получены формулы для определения глубины закаленной зоны от параметров лазерной обработки без оплавления.

5. 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.

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 экспериментального исследования лазерного поверхностного упрочнения образцов из инструментальной стали У8, 40ХН2МА, 5ХВ2С, 9ХС и Х12М позволили осуществить импортозамещение рабочего инструмента и повышение его рабочего ресурса.

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, позволившие осуществить импортозамещение дорогостоящего рабочего инструмента и увеличить ресурс его работы.

Достоверность результатов работы. Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена применением альтернативных методов исследований (аналитические исследования, моделирование, натурный эксперимент) и подтверждается корректностью применения математического аппарата и принятых допущений, применённых при разработке моделей, хорошей сходимостью теоретических и экспериментальных данных, а также успешной апробацией в условиях промышленного производства.

Личный вклад автора. Автор непосредственно участвовал в постановке цели и задач исследований, проведении экспериментов, обработке и анализе результатов исследований совместно с научным руководителем и соавторами публикаций. Им сформулированы основные положения и выводы.

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. «Технологии ковки, прессования, листовой и объемной штамповки, а также формования и комплексных процессов с обработкой давлением, например, непрерывного литья и прокатки заготовок» и п. 6 «Методы оценки напряженного и деформированного состояния и способы увеличения жесткости, прочности и стойкости деформирующего инструмента».

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях: Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования» Севастополь 12 – 14 февраля 2025 года; Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования» Севастополь 10 – 12 мая 2023 года; Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: 81-я международная научно-техническая конференция. – Магнитогорск. 17-21 апреля 2023; International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2021). Sevastopol, Russia, September 6-10, 2021.

Публикации. Материалы диссертации отражены в 17 публикациях, в том числе в 8 статьях из перечня изданий, рецензируемых ВАК РФ, 4 конференциях и 5 публикациях в прочих изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, изложена на 152 страницах машинописного текста, включающего 53 рисунка, 8 таблиц, 3 приложения, библиографический список из 134 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, а также научная и практическая значимость.

В первой главе выполнен аналитический обзор литературы по теме диссертации. 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 нержавеющих сталей с радиусом гибки $R = 10\dots100$ мм и толщиной $s = 0,5\dots5,0$ мм.

Значительный вклад в развитие теории и технологии листовой штамповки внесли отечественные ученые С. И. Губкин, Л. А. Шофман, А. Д. Томленов, М. Н. Горбунов, Е. А. Попов, Н. 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. Marciniaik, W. Johnson, S. Benson и другие.

Важнейшим классом тонкостенных деталей являются детали одинарной кривизны, которые в зависимости от формы контура и поперечного сечения можно разделить на угловые, цилиндрические и конические. Применительно к классу тонкостенных деталей одинарной кривизны в производстве используется ряд способов формообразования, которые отличаются видами технологического инструмента и оснастки. В основном различают 3 вида гибки: свободная (или воздушная) гибка; гибка на основе (или нижняя гибка); чеканка (или калибровка).

На практике широкое распространение получила свободная гибка, применение которой предпочтительно при большой номенклатуре изделий, что характерно для мелкосерийного производства, и невысоким требованиям к точности гибки.

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.

1. Одноступенчатая формовка с помощью матрицы и пуансона, профили которых соответствуют заданной конфигурации заготовки. Однако стоимость прессового инструмента достаточно высокая, и 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. 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.

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

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. Однако, влияние изменения количества ступеней на точность полученного дугообразного профиля, исследовано недостаточно подробно.

В настоящее время наиболее широко используемым материалом для производства листогибочных инструментов являются углеродистые и легированные стали. Из отечественных материалов наибольшее распространение для изготовления пуансонов и матриц листогибочных прессов получили инструментальные углеродистые (типа У8А) и легированные (типа Х12М) стали. Для улучшения механических характеристик технологический инструмент листогибочного пресса подвергается термической обработке, основным видом которой являются различные виды закалки. В наших исследованиях, повышение эксплуатационных свойств достигается методом лазерного упрочнения.

В общем случае на величину усилия гибки и на качество изгибаемых деталей оказывают влияние радиусы закругления рабочих кромок матрицы и радиус наконечника пуансона. 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. Существует потребность в разработке методики определения радиуса наконечника пуансона при воздушной гибке листового металла. Также недостаточно подробно рассмотрены зависимости хода пуансона от технологических параметров свободной гибки.

Во второй главе приведены результаты исследования процесса ступенчатой гибки тонколистового материала. Рассмотрены основы ступенчатой гибки и даны формулы для определения основных параметров: длины дуги изгиба, шага (длины) изгиба ступени, угол гибки, соответствующей одной ступени.

Отклонение ΔR_2 реального (многогранного) наружного профиля листового материала при ступенчатой гибке от идеального профиля в виде окружности радиуса R_2 , будут равно (рисунок 1)

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

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

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

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

Зависимости относительного отклонения δR многогранного профиля от количества ступеней и от угла гибки ступени показаны на рисунках 2-3.

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

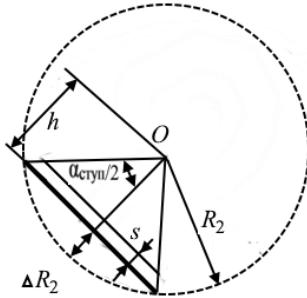


Рисунок 1 – Схема для определения отклонения многогранного наружного профиля листового материала от профиля в виде окружности

В результате математической обработки полученных данных установлено, что эти зависимости очень хорошо описываются степенными функциями, которые показаны на представленных рисунках 2 и 3:

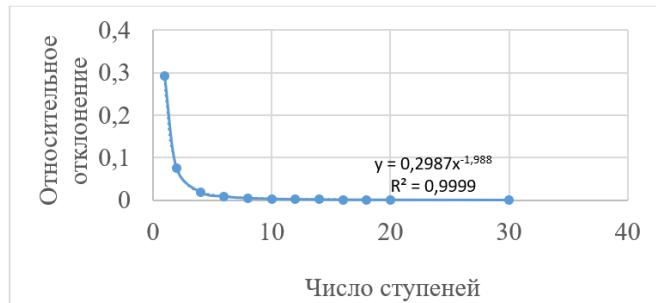


Рисунок 2 – Зависимость относительного отклонения δR многогранного профиля от количества ступеней при полном угле гибки 90°

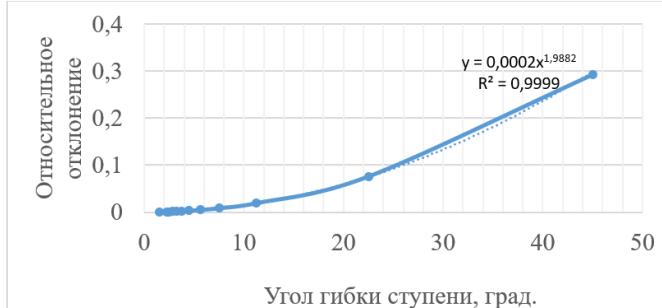


Рисунок 3 – Зависимость относительного отклонения δR профиля от угла гибки ступени

Выбор количества ступеней зависит от требований технического задания на профиль изгибающегося листа. В качестве примера в таблице 1 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 показаны значения ближайших допусков линейных размеров по ГОСТ 25346-2013.

Таблица 1 – 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

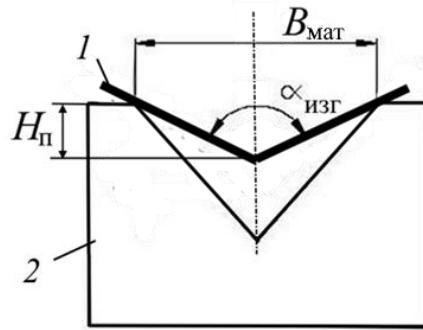
Количество ступеней	Угол гиба ступени, град.	Отклонение		Допуск размера	
		относительное	мм	обозначение	мм
1	90,00	0,2926	29,2612	-	-
2	45,00	0,0760	7,6044	-	-
4	22,50	0,0192	1,9195	h16	2,2000
6	15,00	0,0085	0,8546	h14	0,8700
10	9,00	0,0031	0,3080	h12	0,3500
12	7,50	0,0021	0,2139	h11	0,2200
18	5,00	0,0010	0,0951	h9	0,0870
30	3,00	0,0003	0,0342	h7	0,0350

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

В методе свободной или воздушной гибке, который используется при ступенчатой гибке, присутствует воздушный зазор между листом и стенками V-образной матрицы (рисунок 4.). Верхний башмак (траверса) пресса вдавливает лист на выбранную глубину $H_{\text{п}}$ в паз матрицы с помощью пуансона, при этом лист находится «в воздухе» и не соприкасается со стенками матрицы. Поэтому угол гибки $\alpha_{\text{изг}}$ определяется в основном положением, а не геометрией гибочного инструмента (пуансона). На современном прессе точность настройки составляет 0,01 мм. Из рисунка видно, что ход пуансона $H_{\text{п}}$ и угол гибки $\alpha_{\text{ступ}}$, соответствующий заданному положению пуансона, связаны следующей зависимостью

$$H_{\text{п}} = \frac{B_{\text{мат}}}{2 \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_{\text{ступ}}}{2} \right)}, \quad (4)$$

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



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

Рисунок 4 – Схема определения угла изгиба листового материала при воздушной гибке

Для удобства практического использования выражение для хода пуансона целесообразно представлено в безразмерном виде путем введения относительных (безразмерные) 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

$$H_{\text{п}}^* = \frac{H_{\text{п}}}{s} = \frac{(B_{\text{мат}} / s)}{2 \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_{\text{гиб}}}{2 \cdot Z_{\text{ступ}}} \right)} = \frac{B_{\text{мат}}^*}{2 \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_{\text{гиб}}}{2 \cdot Z_{\text{ступ}}} \right)}, \quad (5)$$

где s – толщина листового материала; $B_{\text{мат}}^*$ и $H_{\text{п}}^*$ – относительные значения ширины паза матрицы и хода пуансона; $Z_{\text{ступ}}$ – количество ступеней (шагов) гибки.

На практике приведенную зависимость 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 5 приведены результаты расчета 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 (уравнения приведены на рисунке), при этом с увеличением отношения паза матрицы к толщине листового материала $B_{\text{мат}}/s$ растет ход пуансона (глубина проникновения пуансона в матрицу). Таким образом, зависимость относительного хода пуансона $H_{\text{п}}/s$ от количества ступеней (шагов) гибки $Z_{\text{ступ}}$ можно представить в следующем виде

$$H_{\text{п}} / s = a \cdot Z_{\text{ступ}} - b, \quad (6)$$

где a и b – коэффициенты, зависящие от отношений паза матрицы к толщине листового материала $B_{\text{мат}}/s$. Из приведенных данных видно, что зависимость коэффициентов уравнения (6) от отношения паза матрицы к толщине листового материала $B_{\text{мат}}/s$ носит линейный характер.

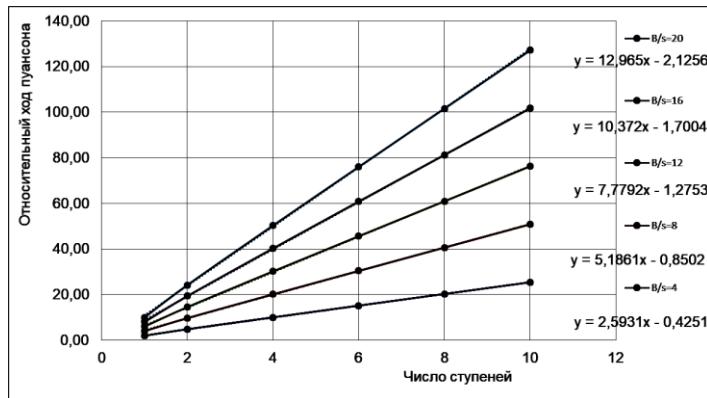


Рисунок 5 – Зависимость относительного хода пуансона H_n/s от количества ступеней (шагов) гибки $Z_{\text{ступ}}$ при различных отношениях паза матрицы к толщине листового материала при полном угле гибки $\alpha_{\text{гиб}} = 90^\circ$.

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

$$H_n/s = (B_{\text{мат}}/s) \cdot [0,65 \cdot Z_{\text{ступ}} - 0,106] \quad (7)$$

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 листовой деформируемый металл, не превышали допускаемого напряжения смятия $[\sigma_{\text{см}}]$, т.е.

$$\sigma_{\text{кон}} \leq [\sigma_{\text{см}}], \quad (8)$$

Для пластичных материалов в условиях статического нагружения в работах допускаемые напряжения смятия предложена следующая зависимость

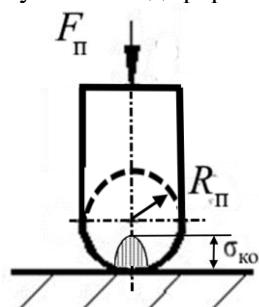
$$[\sigma_{\text{см}}] = \frac{1,5 \cdot \sigma_t}{0,23 + 2,65 \cdot (\sigma_t / \sigma_b)}, \quad (9)$$

где σ_t и σ_b – предел текучести и временное сопротивление материала.

Для определения максимальных контактных напряжений $\sigma_{\text{кон}}$ наконечник пуансона представим в виде цилиндра радиусом $R_{\text{п}}$. (рисунок 6). При давлении цилиндра на листовой 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

$$\sigma_{\text{кон}} = \sqrt{\frac{F_{\text{п}}}{L_{\text{кон}} \cdot R_{\text{п}}} \cdot \frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2}{\pi \cdot [E_1 \cdot (1 - \mu_1^2) + E_2 \cdot (1 - \mu_2^2)]}}, \quad (10)$$

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).

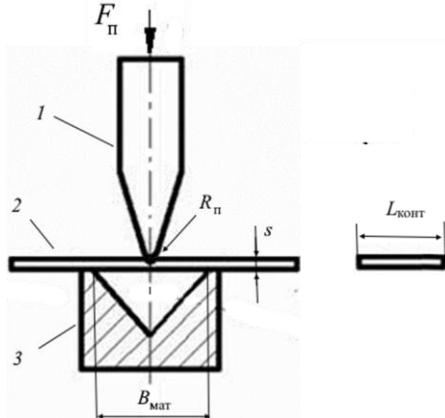


$F_{\text{п}}$ – усилие гибки (усилие пуансона); $R_{\text{п}}$ – радиус цилиндра (наконечника пуансона); $\sigma_{\text{кон}}$ - максимальное давление (напряжение) в зоне контакта.

Рисунок 6 – Схема контакта цилиндра с плоскостью

В начальной стадии воздушной гибки $\alpha = 180^\circ$ и $\beta = 0$ (рисунок 7); поэтому формула для усилия гибки имеет следующий простой вид

$$F_{\Pi} = \frac{\sigma_t \cdot L_{изг} \cdot s^2 \cdot K_{упр}}{B_{мат}}. \quad (11)$$



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

Рисунок 7 – Схема начальной стадии воздушной гибки

Подставляя в формулу (8) выражение для усилия гибки (11), с учетом (9) получим

$$0,798 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_t \cdot s^2}{2 \cdot B_{мат} \cdot R_{\Pi} \cdot \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}} \leq \frac{1,5 \cdot \sigma_t}{0,23 + 2,65 \cdot (\sigma_t / \sigma_b)}, \quad (12)$$

Подставляя в формулу (12) выражение для максимальных контактных напряжений $\sigma_{кон}$ (10) получим

$$R_{\Pi} \geq [R_{\Pi}] \approx \frac{s^2 \cdot [0,23 + 2,65 \cdot (\sigma_t / \sigma_b)]^2}{70 \cdot B_{мат} \cdot \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \cdot \sigma_t} \quad (13)$$

где $[R_{\Pi}]$ – 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 (таблица 2). В качестве материала пуансона использована легированная инструментальная штамповальная сталь марки X12M, которая широко используется в различных отраслях промышленности для изготовления технологического инструмента, предназначенного для холодной деформации металлов.

Таблица 2 – Характеристики использованных материалов

Материал	Физико-механические характеристики			
	σ_{tb} , МПа	σ_b , МПа	E , ГПа	μ
СтальХ18Н10Т	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 $[R_{\Pi}]$:

- от толщины листового материала при относительном расстоянии между рабочими кромками (ширины паза) матрицы $B_{мат}/s = 8$ (рисунок 8);
- от расстояния между рабочими кромками (ширины паза) матрицы $B_{мат}$ для листового материала толщиной $s = 2$ мм (рисунок 9);
- от относительного расстояния между рабочими кромками (ширины паза) матрицы $B_{мат}/s$ (рисунок 10).

Зависимость допускаемого радиуса пуансона $[R_p]$ от толщины листового материала носит линейный характер (уравнения приведены на рисунке), при этом для более прочного металла можно использовать пуансон с меньшим радиусом наконечника (рисунок 8). Так, при толщине листа $s = 5$ мм и ширине паза матрицы $B_{\text{мат}} = 4 \cdot s$ для нержавеющей стали X18H10T с времененным сопротивлением $\sigma_{\text{в}} = 530$ МПа допускаемый радиус пуансона $[R_p] = 2,89$ мм, а для углеродистой стали обыкновенного качества Ст3 с $\sigma_{\text{в}} = 455$ МПа, $[R_p] = 4,64$ мм.

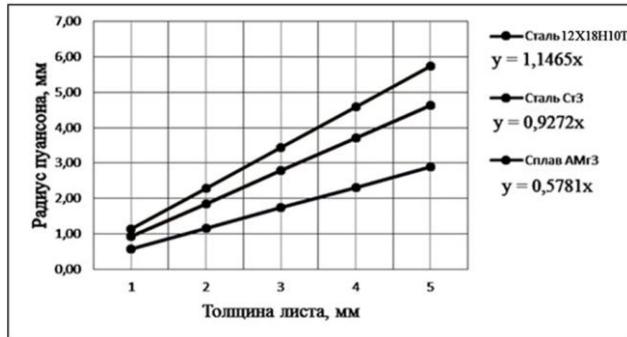


Рисунок 8 – Зависимость допускаемого радиуса пуансона $[R_p]$ от толщины листового материала при расстоянии между рабочими кромками (ширине паза) матрицы $B_{\text{мат}} = 4 \cdot s$.

Зависимость допускаемого радиуса пуансона $[R_p]$ от расстояния между рабочими кромками (ширины паза) матрицы $B_{\text{мат}}$ подчиняется степенному закону (уравнения приведены на рисунке), при этом также для менее прочного металла надо применить пуансоны с большим радиусом наконечника (рисунок 9). Так, при толщине листа $s = 2$ мм и ширине паза матрицы $B_{\text{мат}} = 16$ мм для углеродистой стали обыкновенного качества Ст3 с времененным сопротивлением $\sigma_{\text{в}} = 455$ МПа допускаемый радиус пуансона $[R_p] = 1,85$ мм, а для нержавеющей стали X18H10T с $\sigma_{\text{в}} = 530$ МПа - $[R_p] = 1,16$ мм.

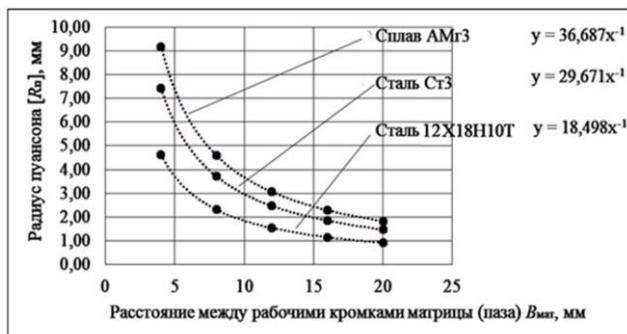


Рисунок 9 – Зависимость допускаемого радиуса пуансона $[R_p]$ от расстояния между рабочими кромками (ширины паза) матрицы $B_{\text{мат}}$ для листового материала толщиной $s = 2$ мм.

Зависимость допускаемого радиуса пуансона $[R_p]$ 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 $[R_p]/s$ (рисунок 10).

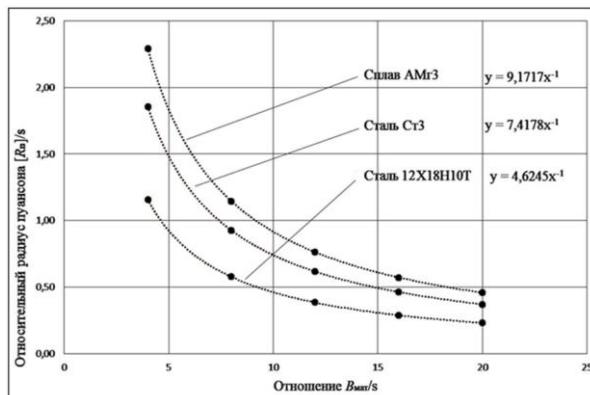


Рисунок 10 – Зависимость относительного значения допускаемого радиуса пуансона $[R_p]/s$ от относительного расстояния между рабочими кромками (ширины паза) матрицы $B_{\text{мат}}/s$

Третья глава посвящена исследованию влияния различных факторов лазерного излучения на повышения работоспособности технологического инструмента ступенчатой гибки тонколистовых металлов. Из анализа литературных источников следует, что основными технологическими параметрами процесса непрерывной лазерной термообработки являются: P - мощность излучения лазера непрерывного действия; d_n - диаметр лазерного пятна на поверхности обрабатываемой детали; V - линейная скорость перемещения лазерного луча относительно обрабатываемой поверхности; S - расстояние (шаг) между серединами соседних лазерных дорожек; $K_{\text{пог}}$ - коэффициент поглощения лазерного излучения покрытием, наносимого на поверхность обрабатываемой детали для снижения ее отражательной способности. Основными характеристиками теплофизических свойств металлов, которые необходимо учитывать при лазерной термообработке, являются: λ - коэффициент теплопроводности; c - удельная теплоемкость; $\alpha = \lambda/(c \cdot \rho)$ - коэффициент температуропроводности, где ρ - плотность; $T_{\text{пл}}$ и $T_{\text{зак}}$ - температуры плавления и закалки.

В настоящее время при анализе процессов лазерной термообработки металлов выбор параметров лазерной обработке металлов различными авторами осуществляется достаточно произвольно. В то же время в теории размерностей и подобия разработаны общие принципы, согласно которым, например, рекомендуется выбирать такие параметры, которые имеют определенный физический смысл и которые, как правило, применяются в классических теориях (механики сплошных сред, теплопроводности и др.). На основе критериальных уравнений теории размерностей и подобия предложены безразмерные (обобщенные) параметры для описания процессов лазерной закалки.

Многочисленными экспериментами по исследованию микроструктуры и по измерению микротвердости в зоне лазерного воздействия установлено, что при лазерной закалке углеродистых и легированных инструментальных сталей без оплавления поверхности можно выделить два различных по природе фазовых превращений слоя. Первый из них соответствует зоне лазерной закалки из твердой фазы, в котором имеет место как полная, так и неполная закалка; нижняя граница первого слоя определяется нагревом металла до критической точки A_{c1} . Второй слой - это переходная зона, которая образуется при нагреве металла ниже критической точки A_{c1} .

Для оценки влияния различных элементов на глубину и твердость закаленного слоя лазерной обработке подвергали образцы из сталей У8, 9ХС, Х12М и 40ХН2МА (рисунок 11). Установлено, что после лазерной обработки стали различных структурных групп имеют различную глубину и твердость закаленного слоя, что объясняется разными температурами закалки рассмотренных групп сталей. При лазерной обработке легированные инструментальные стали, как правило, закаливаются на большую глубину, чем углеродистые, что можно объяснить различием теплотехнических свойств.

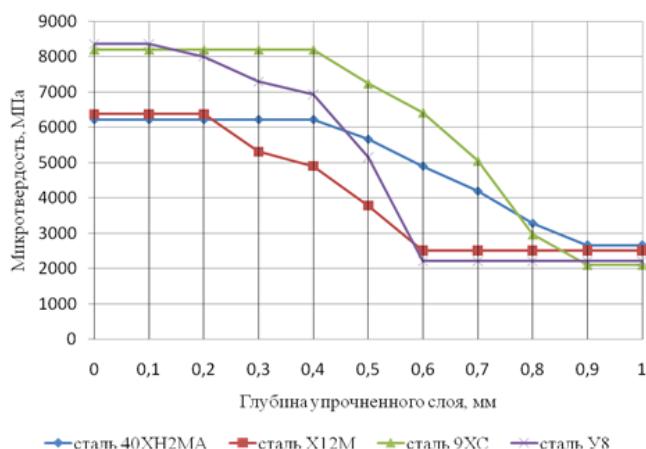


Рисунок 11 – Распределение твердости по глубине упрочненного слоя для различных марок стали

В результате обработки опытных данных, полученных различными исследованиями, а также результатов специально поставленного эксперимента, установлено, что глубина первой зоны упрочнённого слоя в первом приближении пропорциональна коэффициенту теплопроводности λ (рисунок 12). Поэтому для изготовления деталей, которым по условиям эксплуатации требуется большая глубина упрочнённого слоя, можно рекомендовать стали с повышенным содержанием кремния, особенно, в поверхностном слое. Из рисунка видно, что для близких по содержанию углерода сталей У8 и 9ХС глубина закалённого слоя больше для стали 9ХС, у которой содержание кремния выше.

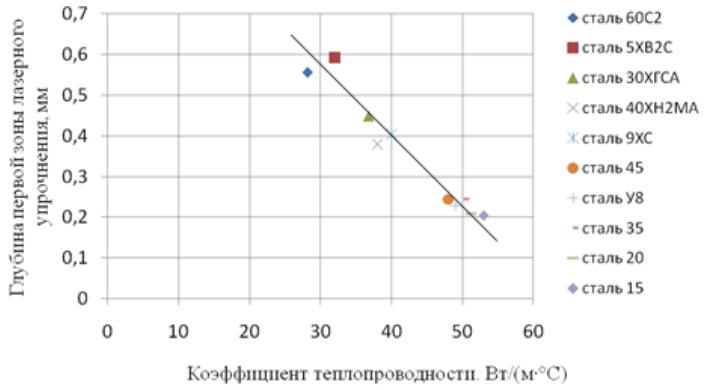


Рисунок 12 – Зависимость глубины первой зоны лазерного упрочнения от коэффициента теплопроводности стали

В отечественной и зарубежной литературе имеется достаточно много экспериментальных данных, связывающих глубину закаленного слоя с отдельными или комбинированными технологическими параметрами лазерной обработки. Однако результаты, полученные различными авторами, противоречивы, трудно сопоставимы друг с другом из-за отсутствия полной информации об условиях проведения экспериментов и часто носят качественный характер. Представленные аналитические выражения являются достаточно простыми, и их удобно использовать для качественного описания тепловых процессов при лазерной обработке. Однако расчёт глубины закалки по ним часто не обеспечивает хорошего совпадения с экспериментальными данными, поскольку в реальных процессах лазерного нагрева сделанные при выходе расчётных формул допущения и предположения, как правило, не соблюдаются.

В связи с недостаточной теоретической проработкой вопросов взаимодействия лазерного излучения с инструментальными сталью разработку математической модели, позволяющей определить глубину закалки в зависимости от параметров лазерной обработки, осуществляли методом математического планирования эксперимента. Основными параметрами, влияющими на глубину $h_{зак}$ закалки лазерно-упрочненных сталей [мм], выбраны мощность P лазерного излучения [кВт], диаметр d_n лазерного пятна [мм] и скорость V перемещения лазерного луча по обрабатываемой поверхности [мм/с].

Для определения коэффициентов уравнения регрессии использовали ортогональный композиционный план третьего порядка, содержащий 20 точек, при этом для повышения достоверности экспериментальных данных в каждой точке плана проводили 3 повторных опыта; таким образом, всего было испытано 60 вырубных штампов. После проверки однородности дисперсий (по критерию Кохрена), оценки значимости коэффициентов уравнения регрессии (по критерию Стьюдента) и адекватности модели (по критерию Фишера) получена следующая статистическая модель глубины зоны закалки вырубного штампа, изготовленного из углеродистой инструментальной стали У8.

$$h_{зак} = (-0,0219 + 0,007 \cdot V - 0,000089 \cdot V^2) + (1 - 0,046 \cdot V + 0,00063 \cdot V^2) \cdot P. \quad (14)$$

Для обобщения полученных результатов и возможности распространения полученной математической модели на другие марки инструментальных сталей в работе впервые предложено использовать безразмерные (обобщенные) параметры: $\hat{h}_{зак}$ – относительная глубина закалки, κ – комплексный показатель лазерного излучения, которые определяются по формулам

$$\hat{h}_{зак} = \frac{h_{зак}}{h_0}, \quad \kappa = \frac{P^*}{\sqrt{V}}. \quad (15)$$

В этих формулах введены следующие обозначения

$$h_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot d_n}{\pi \cdot V}}, \quad P^* = \frac{2 \cdot K_{ног} \cdot P}{d_n \cdot \lambda \cdot T_{пп}}, \quad V^* = \frac{V \cdot d_n}{4 \cdot a}. \quad (16)$$

По физическому смыслу параметры P^* и V^* представляют собой безразмерные значения мощности и скорости лазерной обработки соответственно. Величина h_0 может быть интерпретирована как теоретическая максимально возможная глубина закаленного слоя, достигаемая при бесконечно большой мощности лазерного излучения, т.е. при $P \rightarrow \infty$. Используя приведенные выше формулы и подставляя в них

соответствующие теплофизические характеристики стали У8, зависимость можно преобразовать к следующему обобщенному виду

$$\hat{h}_{\text{зак}} = -0,055 + 0,248 \cdot \kappa. \quad (17)$$

В связи с тем, что в этой обобщенной зависимости использованы теплофизические характеристики обрабатываемого материала a , λ , и $T_{\text{пл}}$, а также безразмерные (обобщенные) параметры скорости V^* и мощности P^* лазерной обработки, то разработанная математическая модель может быть применена для оценки глубины закалки других инструментальных сталей, используемых для изготовления вырубных штампов холодного деформирования. Обработка результатов экспериментов, проведенных другими авторами, а также данных, полученных при лазерной закалке углеродистой стали У10 и легированных сталей 9ХС, Х12М и 40ХН2МА, показала их хорошее соответствие с предложенной зависимостью (рисунок 13).

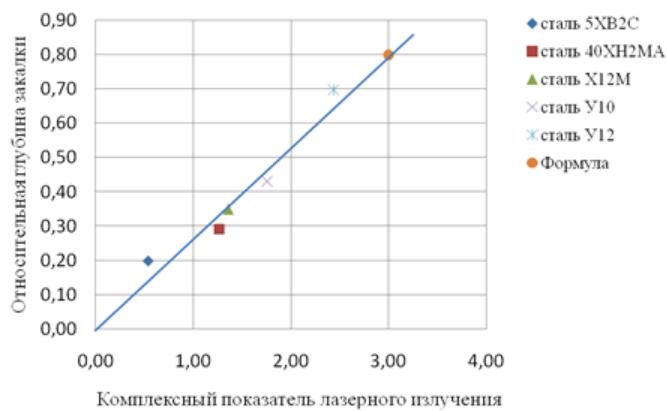


Рисунок 13 – Зависимость относительной глубины $\hat{h}_{\text{зак}}$ закалки от комплексного показателя лазерного излучения κ для различных сталей

Для построения статистической модели глубины зоны лазерного воздействия от параметров лазерного излучения в наших исследованиях использовали методы математического планирования эксперимента, а с целью обобщения полученных результатов на основе применения соотношений теории подобия предложено использовать следующие безразмерные (обобщенные) параметры:

1) коэффициент перекрытия лазерных дорожек

$$S^* = \frac{S}{d_{\text{n}}}, \quad (18)$$

2) относительная мощность лазерной обработки

$$P^* = \frac{2 \cdot K_{\text{пог}} \cdot P}{d_{\text{n}} \cdot \lambda \cdot T_{\text{пл}}}, \quad (19)$$

3) относительная скорость перемещения лазерного луча

$$V^* = \frac{V \cdot d_{\text{n}}}{4 \cdot a}, \quad (20)$$

4) относительная глубина закалённого слоя

$$h_{\text{зак}}^* = \frac{4 \cdot h_{\text{зак}} \cdot P}{\pi \cdot d_{\text{n}}^2 \cdot (T_{\text{пл}} - T_{\text{зак}}) \cdot \lambda}. \quad (21)$$

По сравнению с известными из научно-технической литературы параметрами, предложенные безразмерные комплексы выгодно отличаются тем, что они одновременно учитывают, как технологические параметры лазерной обработки, так и теплофизические характеристики обрабатываемого металла, и имеют ясный физический смысл.

Коэффициент перекрытия S^* характеризует влияние последующих соседних лазерных дорожек на предыдущие: при $S^* < 1$ дорожки перекрываются, и структура материала в предыдущей зоне лазерного

воздействия изменяется; обычно при $S^* > 2$ взаимным влиянием соседних дорожек можно пренебречь, и поэтому данное условие часто используется при лазерной закалке технологического инструмента ОМД.

Величина P^* соответствует отношению эффективной мощности лазерного излучения $P_{\text{эф}} = K_{\text{пог}} \cdot P$ к мощности, которое может быть отведено от поверхности за счет теплопроводности вглубь металла без его плавления.

Величина V^* равна отношению скорости перемещения лазерного луча к скорости распространения температурного фронта в данном материале.

В качестве относительной величины $h_{\text{зак}}^*$ принято отношение глубины закаленного слоя $h_{\text{зак}}$ к максимально возможному теоретическому значению $h_{\text{нax}}$, которое достигается в том случае, когда температура на поверхности металла доходит до температуры его плавления – в этом случае $h_{\text{зак}}^* = 1$.

В качестве примера использования приведенных выше зависимостей рассмотрим экспериментальные данные, представленные в таблице 3 при лазерной обработке конструкционной легированной стали типа 40ХН2МА, которая применяется для производства штампов холодного деформирования.

Анализ экспериментальных точек показывает, графики можно представить в виде ряда параллельных прямых, соответствующих различным скоростям перемещения лазерного луча V^* . После математической обработки данных получены следующие уравнения

$$\text{при } V^* = 1,67 \text{ (} V = 0,5 \text{ м/мин) } h_{\text{зак}}^* = 0,926 \cdot P^* - 1,017;$$

$$\text{при } V^* = 3,33 \text{ (} V = 1,0 \text{ м/мин) } h_{\text{зак}}^* = 0,929 \cdot P^* - 1,256;$$

$$\text{при } V^* = 5,00 \text{ (} V = 1,5 \text{ м/мин) } h_{\text{зак}}^* = 0,936 \cdot P^* - 1,775;$$

$$\text{при } V^* = 5,00 \text{ (} V = 1,5 \text{ м/мин) } h_{\text{зак}}^* = 0,922 \cdot P^* - 2,588.$$

Объединяя полученные результаты, можно записать

$$h_{\text{зак}}^* \approx 0,933 \cdot P^* - P_0^* \quad \text{при } P^* \geq P_0^*. \quad (22)$$

Второй член в этих формулах соответствует начальному значению относительной мощности лазерного излучения P_0^* , при котором не происходит нагрев поверхности до температуры закалки. Его величина зависит от скорости перемещения луча (рисунок 14).

После математической обработки данных получено следующее уравнение, величина достоверной аппроксимации которого составляет $R^2 = 0,998$.

$$P_0^* = 1 - 0,345 \cdot V^* + 0,0368 \cdot (V^*)^2. \quad (23)$$

Таблица 3 – Зависимость глубины закаленного слоя от мощности лазерного излучения и скорости перемещения лазерного луча

Параметры лазерной обработки				Глубина закаленного слоя	
Скорость перемещения лазерного луча		Мощность лазерного излучения		$h_{\text{зак}}$, мм	$h_{\text{зак}}^*$
V , м/мин	V^*	P , Вт	P^*		
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

Строго говоря, полученные формулы и приведенные графики справедлива только для тех диапазонов изменения параметров лазерного излучения, которые использованы в эксперименте. В то же время их можно применять и для других марок сталей, поскольку в них использованы относительные (безразмерные) значения мощности лазерного излучения и скорости перемещения лазерного луча. Расчеты показали, что отклонение полученных значений глубины зоны закалки от экспериментальных данных не превышает 7 %.

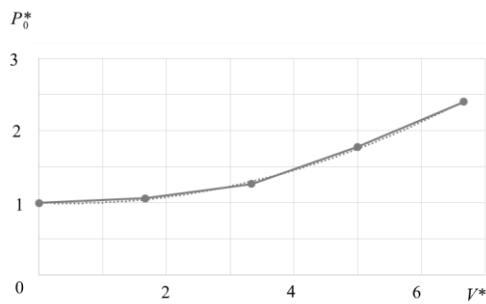


Рисунок 14 – Зависимость начальной относительной мощности лазерного излучения P_0^* от относительной скорости перемещения лазерного луча V^*

Для исследования в качестве материала штампов для холодного деформирования выбрана наиболее распространенная инструментальная полутеплоспокойная сталь X12M. В соответствии с разработанным планом эксперимента, цель которого состояла в исследовании процесса и определении оптимальных режимов лазерной закалки без оплавления поверхности обрабатываемого материала, было проведено 72 опыта, результаты которых приведены в таблице 4 и на рисунке 15; при этом в каждой точке матрицы планирования проведено 3 опыта,

Анализ результатов эксперимента показывает, что максимальная глубина закалки образцов из стали X12M без оплавления поверхности составила $h_{зак} = 0,75...0,80$ мм. Большая глубина закаленной зоны ($h_{зак} = 1,15...1,35$ мм) достигается при режимах, вызывающих оплавление поверхности.

Для получения обобщенных статистических зависимостей полученные данные преобразовали с учетом безразмерных (обобщенных) параметров (формулы 18 – 21). Соответствующие зависимости безразмерной глубины закаленной зоны $h_{зак}$ от безразмерной скорости V^* при различных значениях мощности лазерного излучения P приведены на рисунке 16.

Таблица 4 – Матрица планирования эксперимента по лазерной обработке стали X12M

Номер точки матрицы	Параметры лазерной обработки		Глубина зоны закалки, $h_{зак}$, мм
	Мощность лазерного излучения P , кВт	Скорость перемещения лазерного луча V , мм/с	
1	1,24	33,3	0,1
2		23,3	0,2
3		16,7	0,5
4		12,0	0,8
5		8,7	1,0*
6		6,2	1,3*
7	0,97	33,3	0,1
8		23,3	0,1
9		16,7	0,3
10		12,0	0,5
11		8,7	0,8*
12		6,2	1,1*
13	0,85	33,3	0
14		23,3	0
15		16,7	0,1
16		12,0	0,2
17		8,7	0,6
18		6,2	0,9
19	0,72	33,3	0
20		23,3	0
21		16,7	0
22		12,0	0,1
23		8,7	0,1
24		6,2	0,2

*- отмечены опыты, в которых происходило оплавление поверхности

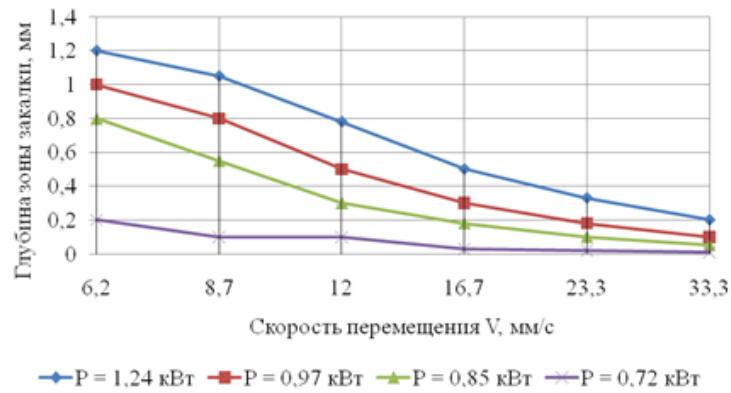


Рисунок 15 – Зависимость глубины зоны закалки $h_{\text{зак}}$, мм, от скорости перемещения лазерного луча V , мм/с, при различной мощности лазерного излучения P , кВт

В результате математической обработки экспериментальных данных получена следующая формула для определения относительной глубины закаленной зоны при заданных параметрах лазерной обработки без оплавления поверхности

$$h = 0,00649 \cdot (P^*)^{2,22} \cdot (V^*)^{-2,0}. \quad (24)$$

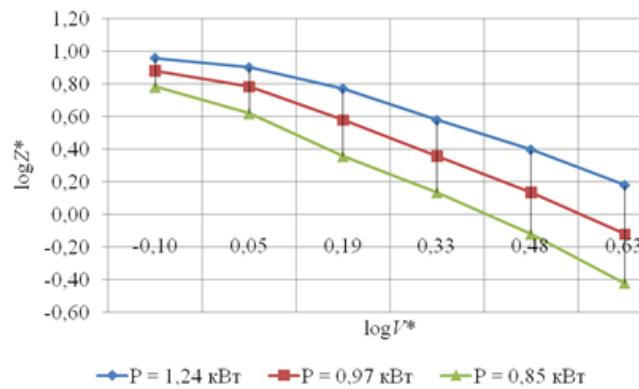


Рисунок 16 – Зависимость безразмерной глубины зоны закалки Z^* от безразмерной скорости V^* перемещения лазерного луча при различных значениях мощности лазерного излучения P .

Для более удобного практического использования эту зависимость можно представить графически в виде линий равного уровня $Z^* =$ (рисунок 17).

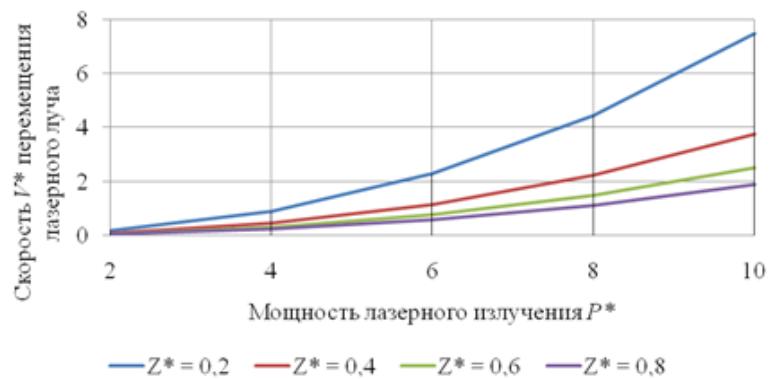


Рисунок 17 – Линии равного уровня относительной глубины зоны закалки Z^*

Лазерную термообработку инструментальной стали X12M необходимо проводить так, чтобы температура поверхности обрабатываемого металла $T_{\text{пов}}$ находилась в диапазоне $T_{\text{зак}} < T_{\text{пов}} < T_{\text{пл}}$. Для ориентировочного выбора соответствующих значений мощности и лазерного излучения P и скорости перемещения лазерного луча V можно воспользоваться диаграммой, представленной на рисунке 18.

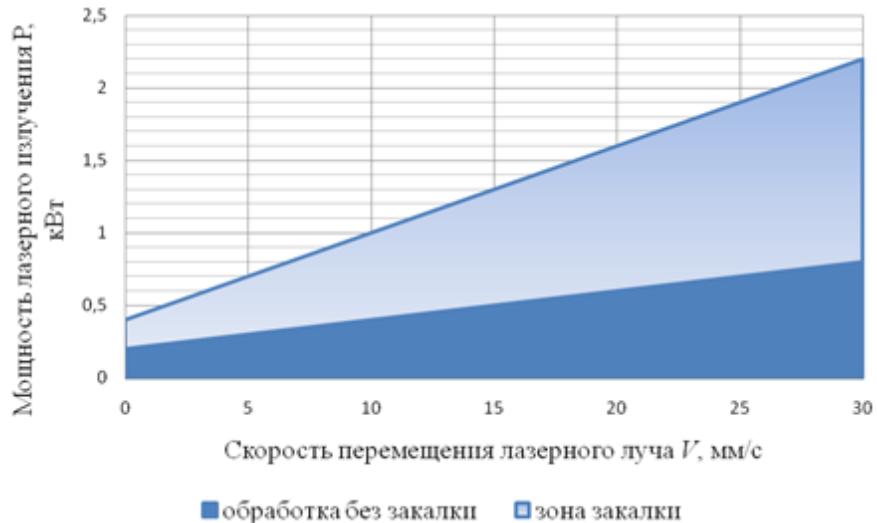


Рисунок 18 – Расположение зоны закалки стали X12M без оплавления поверхности

Следует отметить, что результаты, полученные в наших экспериментах, хорошо согласуются с данными других авторов, и поэтому использование предложенных в работе безразмерных параметров позволяет единообразно описать закономерности лазерной закалки для различных марок стали.

В общем случае микроструктуру стали X12M в зоне лазерного воздействия можно разделить на три основных зоны: зона оплавления, полученная при закалке из расплавленного состояния; зона закалки из твердой фазы, образующаяся при нагреве до температуры выше точки $A_{\text{c}1}$; переходная зона (зона отпуска без предварительной закалки).

В четвертой главе приведены результаты по разработке и внедрении технологий ступенчатой гибки в промышленности и учебном процессе.

При изготовлении тонкостенных корпусов небольших устройств мелкосерийного или единичного производства часто применяются принципы 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. С учетом требований, предъявляемых к качеству корпусов, наиболее подходящим вариантом является технология ступенчатой гибки.

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 *EHT profipress 130* на базе предприятия ООО «Профлазермет» и *Durma AD-R 25100* на базе предприятия «*BASEMENTLAB*». 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).

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. Поэтому 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 19). Все эти операции значительно сгладили прямые участки, сделав изделие внешне неотличимым от альтернативных ей технологий.



Рисунок 19 – Корпус устройства, выполненный из стального листа толщиной 4 мм с применением технологии ступенчатой 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 небольшой серии прототипов тонкостенных корпусов различных изделий.

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. 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.

С применением технологии ступенчатой гибки изготовлены различные тонкостенные детали прототипа универсального плазменного низкотемпературного стерилизатора серии Пластер Мед ТeКо. В качестве примера использования технологии ступенчатой гибки рассмотрим процесс получения дугообразного сегмента бампера двери стерилизатора, аксонометрическое изображение которого показано на рисунке 20, а его продольный разрез на рисунке 21. Окончательное качество заготовки при такой формовке зависит от количества изгибов и шага между ними - чем их больше, тем более гладким будет поверхность изделия.

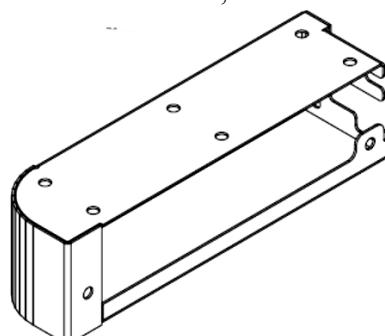


Рисунок 20 – Аксонометрическое изображение бампера двери стерилизатора

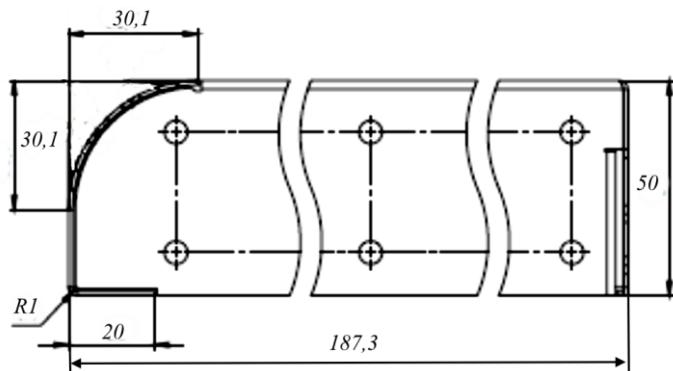


Рисунок 21 – Продольный разрез чертежа бампера двери стерилизатора

В разделе 2.2 показано, что для деталей, наружные размеры которых должны быть выполнены по квалитету $h12$ (ГОСТ 25346-2013), количество ступеней должно быть $Z_{ct} \geq 10$, по квалитету $h14$, $- Z_{ct} \geq 6$. В рассматриваемом случае с некоторым запасом принято $Z_{ct} = 10$, 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 $\alpha_{ступ} = 4,5^\circ$. Развёрнутый вид деформируемой заготовки бампера двери с указанием линий изгиба показан на рисунке 22.

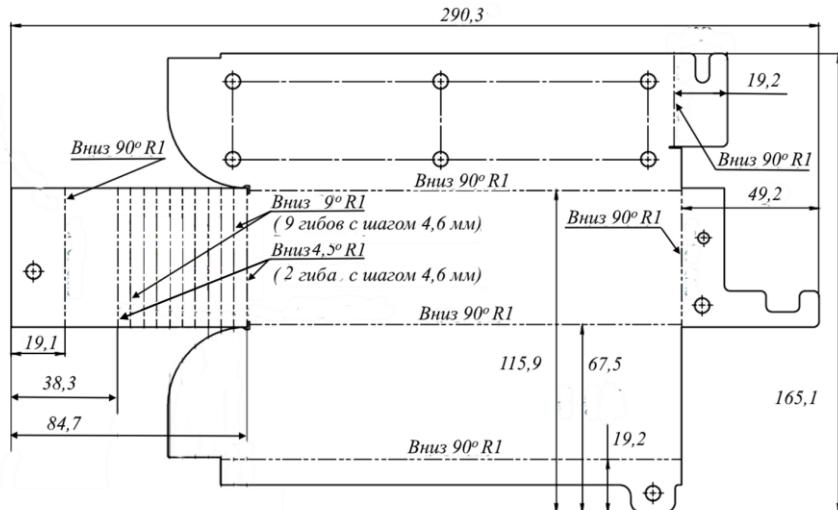


Рисунок 22 – Развёрнутый вид деформируемой заготовки бампера двери стерилизатора с указанием линий изгиба

Одной из основных проблем в эксплуатации пуансонов и матриц является их износ, что приводит к необходимости регулярной замены. В России отсутствуют производители рабочего инструмента для зарубежных листогибочных прессов, что приводит к увеличению затрат на производство и вынуждает искать других зарубежных поставщиков. В связи с этим перспективным является импортозамещение рабочего инструмента зарубежных листогибочных прессов методом обратного инжиниринга (реверс-инжиниринга), который рассмотрим на примере листогибочного пресса *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. 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.

Традиционные методы измерения объекта достаточно трудоемки и их применение требует значительных затрат времени, и поэтому в данной работе использована технология лазерного сканирования. 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 изображены на рисунках 23.

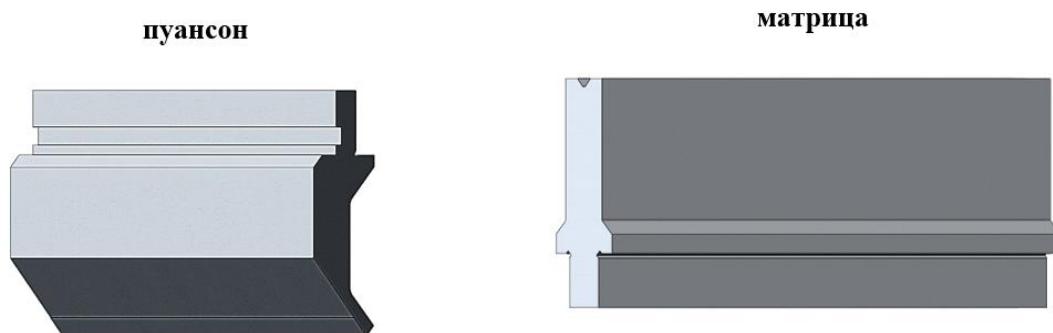


Рисунок 23 – 3D-модели изделий

На основе 3D-модели созданы чертежи, которые позволили получить техническую документацию, которая упрощает процесс производства и повышает его качество.

Материал пуансона иностранного производителя (высоколегированная сталь 42CrMo4) заменен отечественной инструментальной сталью X12M, которая имеет аналогичные физико-механические характеристики и часто применяется для изготовления пуансонов и других инструментов, работающих при высоких нагрузках и требующих повышенной прочности и твердости. Материал матрицы иностранного производителя (углеродистая сталь С45) заменен отечественной инструментальной нелегированной сталью У8А, которая имеющим аналогичную твердость и обладает хорошей прочностью, твердостью и износостойкостью.

Используя полученные данные, был разработан технологический процесс изготовления пуансонов и матриц, включая операции фрезерования, лазерного упрочнения 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 оборудования.

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, X12M). 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 Х12М и конструкционной легированной стали 40ХН2МА, получены формулы для определения глубины закаленной зоны от параметров лазерной обработки без оплавления.

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, 40ХН2МА, 5ХВ2С, 9ХС и Х12М 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 конструкций» и «Инжиниринг оборудования для обработки металлов давлением».

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. **Karfidov A. O.**, Chichenev N. A., Chicheneva O. N., 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/cisir.2021.02.07.

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

Karfidov A. O., Vasiliev M. V., Svinarev M. D., Chichenev N. A. Prototyping Step-by-Step Bending of Thin Walled Vessels // Steel in Translation, 2022, 52(7), pp. 698–700.

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

Karfidov A. O., Chichenev N. A., Chicheneva O. N., Pashkov A. N., Gorovaya T. Y. Technological Factors of Laser Hardening of Rolls of Multi-Roll Mills // Metallurgist , 2023, 66 (11-12), pp. 1562–1572

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

Karfidov A. O., Chichenev N. A., Vasil'ev M. V., Chicheneva O. N. Step Bending of Sheet Metal in the Manufacture of Thin-Walled Body Parts // Steel in Translation, 2023, Vol. 53, No. 8, pp. 690–693.

5. **Карфидов А. О.**, Чиченев Н. А., Васильев М. В., 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.

6. **Карфидов А. О.**, Горбатюк С. М., 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

7. **Karfidov A. O.**, Chichenev N. A., Vasil'ev M. V., Chicheneva O. N. The effect of laser hardening on the operation resistance of rolls of multi-roll mills and the quality of the rolling strip // CIS Iron and Steel Review — Vol. 26 (2023), pp. 58–63.

8. **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 Всероссийских научно-практических конференций Севастополь: ФГАОУ ВО «СГУ», 2023. – с. 220-222.

9. **Карфидов А. О.**, Чиченев Н. А., Васильев М. В., Чиченева О. Н. Определение параметров ступенчатой гибки тонколистового металла // Черные металлы. 2024. №1. С. 17-20.
10. **Karfidov A. O.**, Chichenev N. A., Gorbatyuk S. M., Chicheneva O. N.. Experimental study of the process of laser treatment of steel Kh12M // CIS Iron and Steel Review — Vol. 27 (2024), pp. 103–10. DOI: 10.17580/cisisr.2024.01.16.
11. **Карфидов А. О.** Ефремов А. А., Морозова И. Г., Наумова И. Г., Чиченева О. Н., Импортозамещение рабочего инструмента листогибочного пресса CAOSTONE CONE 900 // Сталь. 2024. №5. С. 29-31.
12. Чиченев Н.А., **Карфидов А.О.**, Васильев М.В., Чиченева О.Н. Лазерная закалка технологического инструмента обработки металлов давлением // Черные металлы- 2024. №11. С.81-85. DOI: 10.17580/chm.2024.11.14
13. **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.
14. **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>.
15. **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.
16. **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.
17. **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 // Металлург, 2025. №10. С. 30-34.