

На правах рукописи

БОЯРСКИЙ Даниил Сергеевич

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛЕЙ
W- ОБРАЗНОЙ ФОРМЫ С УТОЛЩЕНИЕМ В УГЛАХ

Специальность 2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет).

Научный руководитель: **Владимир Дмитриевич Баскаков**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Гун Игорь Геннадьевич** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий, сертификации и сервиса автомобилей «ФГБОУ ВО Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова Генеральный директор АО НПО «БелМаг» (Магнитогорск).

Типалин Сергей Александрович кандидат технических наук, профессор «ФГАОУ ВО Московский политехнический университет»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»**

Защита диссертации состоится «__»_____ 2025г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.01 в «Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана» по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru. Телефон для справок 8(499)267-09-63

Автореферат разослан «__»_____2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.01,
кандидат технических наук, доцент



Плохих А.И.

Актуальность работы.

В различных отраслях машиностроения широко применяются тонкостенные детали ломаного контура (V-образные, W-образные и пилообразные). Например, в летательных аппаратах это элементы силового набора (шпангоуты и стрингеры), в теплообменниках – гофрированные пластины, в электросиловых установках – шины электрических цепей.

В основе изготовления таких деталей лежит технология гибки листовых заготовок. Эта технология хорошо изучена благодаря трудам большого числа ученых, а также учебных и промышленных организаций. Характерным сопутствующим фактором технологии гибки, как показали многочисленные научные исследования, является утонение в углах деталей. Оно может существенно осложнить функционирование многих машин: снижается несущая способность силовых конструкций, снижается теплопроводность и электропроводность.

В классе тонкостенных деталей ломаного контура широкую группу образуют комплектующие детали к решетчатым (сотовым) сборно-паяным конструкциям с квадратными ячейками. В углах деталей создаются стыковочные площадки, в которых формируются паяные соединения. В результате образуются квадратные ячейки с ребрами – планами. Ломаный контур деталей может иметь любое число звеньев и быть создан на прессе двойного действия, где один пуансон фиксирует готовое звено детали, а другой пуансон осуществляет формирование нового звена.

Утонение в углах деталей для решетчатых (сотовых) конструкций уменьшает площадку стыка между деталями, и как следствие, прочность и жесткость конструкции в целом.

Известны научные работы, посвященные утолщению деталей в углах. Для компенсации гибочного утонения в угле V - образных деталей в Национальном институте авиационных технологий (М.А.Бабурин и др.) предложена технология 2-х операционного формообразования. На 1-й операции изготавливался полуфабрикат с углом, меньшим, чем у готовой детали, что создавало избыток металла. На 2-й операции осуществлялась формовка полуфабриката и за счет сжатия полок по длине достигалось утолщение вершины детали. Подобные технологии гибки V - образных деталей предложены в МГТУ им. Н.Э. Баумана (А.В. Власов и др.) и в Самарском государственном аэрокосмическом университете (В.К. Моисеев и др.).

Однако сжимающие напряжения в области пластических деформаций вызывают потерю устойчивости и образование гофров в полках деталей. После их извлечения из штамповой оснастки деталей остаточная волнистость может превысить допустимые значения, заданные конструкторской документацией.

Таким образом, повышение толщины деталей ломаного контура в углах с учетом ограничений на величину волнистости полок является **актуальной задачей** как для машиностроения в целом, так и для производства решетчатых конструкций.

Предметом исследования являются процессы образования гофров и утолщения в углах наиболее сложных в изготовлении деталей решетчатых конструкций – деталей W-образной формы.

Цель диссертации: Повышение качества W-образных деталей за счет утолщения стенки в углах для обеспечения точности формы и положения плоскостей решетчатых конструкций.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие **задачи исследования:**

1. Проведение анализа существующих технологий изготовления тонкостенных деталей ломаного контура.
2. Проведение теоретических исследований и математическое описание процесса формоизменения заготовок при листовой штамповке W-образных деталей.
3. Проведение экспериментальных исследований процесса штамповки W-образных деталей из листовой заготовки с избытком длины.
4. Разработка методического обеспечения для проектирования технологии штамповки W-образных деталей из заготовок с избытком длины, что обеспечит утолщение стенки в углах.
5. Проведение опытно - промышленной апробации созданного методического обеспечения при изготовлении W-образных деталей из листовых материалов для решетчатых (сотовых) конструкций.

Научная новизна работы заключается в оригинальных математических моделях процесса листовой штамповки, описывающих зависимость от длины заготовки утолщения W-образных деталей в углах и гофрообразование полок.

Признаками научной новизны обладают:

- методика определения числа полувогн и высоты профиля волнистости на полках детали после формовки полуфабриката;
- выявленные закономерности процесса образования гофров при взаимодействии с поверхностями штамповой оснастки;
- статистические данные о стабильности предложенной технологии штамповки W-образных деталей;
- установленная закономерность снижения дисбаланса сил растяжения и сжатия в сечении за счет величины поперечных напряжений, создаваемых центральным пуансоном на прессе двойного действия.

Практическая значимость работы состоит:

- в разработанной технологии штамповки W-образных деталей с утолщением в углах, обеспечивающей повышение их качества (патент на изобретение RU 2 791 199 C1);
- в предложенных зависимостях для обоснования геометрических параметров рабочего инструмента и исходной заготовки при листовой штамповке W-образных деталей с утолщением в углах.

Использование предложенных рекомендаций на предприятиях АО «НПО «Техномаш» и ООО «Технощит» подтверждает практическую значимость разработок.

Научно-практические положения, выносимые на защиту:

- установленные закономерности утолщения в углах деталей W-образной формы при их изготовлении из листовых заготовок с избытком длины как основа для управления технологическим процессом штамповки;
- энергетический подход к определению границ между утолщением в углах деталей W-образной формы и увеличением числа полуволн в сжимаемых полках для назначения технологических режимов штамповки;
- экспериментально установленная закономерность утолщения в углах деталей W-образной формы с ростом избытка длины заготовки;
- разработанные рекомендации для назначения размеров заготовки и штампов в технологическом процессе штамповки деталей W-образной формы, обеспечивающих утолщение углов деталей при допустимой остаточной волнистости полок.

Методы исследований. Теоретические положения работы базируются на использовании верифицированных аналитических и численных методов исследования, положений теории листовой штамповки, математической статистики, сертифицированных методов измерения линейных и угловых размеров, микрогеометрии профиля поверхностей деталей.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, изложенных в работе, обеспечиваются корректным применением математических методов анализа, известных методов экспериментальных исследований на аттестованном оборудовании, сходимостью результатов аналитических моделей с экспериментальными данными, а также практическим использованием предложенной технологии изготовления W-образных деталей к решетчатым конструкциям.

Апробация результатов работы. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на следующих конференциях: Международные конференции «XLII, XLVII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и др.» (г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана) в 2018; 2023г.г., V Международная научно-техническая конференция «Новые материалы, подходы и технологии проектирования, производства и эксплуатации ракетно-космической техники» (Москва, 3 декабря 2021 г.) (2 доклада).

Публикации. Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в 8 статьях общим объемом 7,5 п.л., опубликованных в журналах перечней ВАК РФ, Scopus. По материалам диссертации получен патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Содержит 153 страниц, из которых на 142 страницах изложен основной текст, проиллюстрированный 107 рисунками и 6 таблицами. Список литературы состоит из 75 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, научная новизна и практическая значимость, а также основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проведен литературный обзор, посвященный технологиям гибки листовых деталей ломаного контура с утолщением в углах. Теоретические основы технологии гибки создавались многими организациями (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ (ТУ), МАТИ, ТГУ, СГАУ им С.П.Королева, МГТУ «Станкин», НПО «Техномаш», НИАТ и др.) и такими учеными, как А.Л. Абибов, Б.В.Бойцов, В.А.Барвинок, А.Г. Братухин, Е.А.Попов, М.В. Сторожев, В.Т.Мещерина, М.Н.Горбунов, В.Н.Романовский, А.М. Дмитриев, В.И. Ершов, А.С. Чумадин, А.Н. Малов, R. Hill, S.F. Golovatschenko и др. Характерным эффектом, сопровождающим процесс гибки, является утонение, которое существенно осложняет функционирование многих машин. Применительно к сотовым паяным конструкциям утонение приводит к снижению площади стыка между деталями, а также прочности соединений и жесткости конструкции.

В связи этим поиск научно обоснованных решений для компенсации утонения технологическими средствами является актуальной задачей.

Из публикаций известны предложения по созданию утолщения в углах деталей. Все они основаны на создании избытка металла и на последующем обжатию полуфабриката в области угла, в результате чего металл в угле утолщается. Здесь можно выделить технологию гибки V- образной детали из листовой заготовки с утолщением в угле, предложенную М.А. Бабуриным в НИАТ. В соответствии с этой технологией на 1-й операции происходит гибка на угол, меньший номинального, что приводит к формированию избытка металла. На 2-й операции осуществляется формовка полуфабриката и за счет осадки полок достигается утолщение в вершине детали. Похожие технологии были предложены А.В. Власовым в МГТУ им. Н.Э. Баумана и В.К. Моисеевым в СГАУ им. С.П. Королева.

Ключевое значение при реализации таких технологий имеет учет сжимающих напряжений в полках детали. Эти напряжения могут привести к потере устойчивости контура полок и образованию гофров при пластическом деформировании.

Основы анализа потери устойчивости были заложены Л. Эйлером, а в дальнейшем развиты в работах В.И. Феодосьева, Ю.Н. Работнова и др. Но технологическую науку интересует не только момент потери устойчивости, но и число гофров, а также их амплитуда. Изучение процесса потери устойчивости полок деталей при гибке также осложняется необходимостью учета взаимодействия полок с поверхностями штамповой оснастки.

С учетом вышесказанного в первой главе работы были сформулированы задачи исследований.

Вторая глава посвящена проведению теоретических исследований для обоснования выбора технологических режимов штамповки, геометрических параметров заготовок и оснастки.

Предложена технологическая схема штамповки W-образных деталей с утолщением в углах, новизна которой подтверждена патентом на изобретение. На первой операции осуществлялась гибка центральным пуансоном центральных полок полуфабриката. Затем боковые пуансоны проводили гибку боковых полок полуфабриката. При этом углы между полками выбирались меньшими 90° , что создавало избыток металла. На второй операции проводилась формовка полуфабриката с утолщением углов. Сначала боковые пуансоны прижимали боковые полки детали, а затем центральный пуансон выполнял формовку полуфабриката с утолщением в углах. Углы между полками обеспечивались равными 90° .

Исследование влияния сопутствующих факторов с учетом сложных граничных условий проведено с помощью программных комплексов конечно-элементного моделирования. В качестве граничных условий при анализе гибки и формовки полуфабриката принималось, что плоскости штампа являются жесткими и недеформируемыми, а на поверхностях контакта действуют силы Кулоновского трения.

Для описания диаграмм деформирования сплавов использовались полиномом 2-й степени и степенная зависимость. Для случая использования малоизученных сплавов в работе предложена схема определения коэффициентов аппроксимации по результатам испытаний на разрывной машине. Также возможно использование справочных данных о пределе текучести, временном сопротивлении, относительном удлинении и модуле упругости. Установлено, что с точностью 12% деформацию, соответствующую временному сопротивлению, можно принять пропорциональной относительному удлинению $\delta_0, \%$, т.е. $\varepsilon_B = \chi \delta_0$, где $\chi = 0,644$. Статистика набиралась по 40 сплавам, в том числе по 20-ти сталям.

Проведен анализ факторов, влияющих на утонение заготовки при гибке на малый радиус (Рисунок 1). Неизменными принимались длина и толщина пластины, а также расстояние между галтелями матрицы. Варьировались радиус при вершине пуансона и марки сплавов деталей.

Расчёты в программном комплексе Deform-3D показали, что утонение заготовки при гибке зависит от отношения толщины заготовки δ к радиусу r_0 вершины пуансона, а также от отношения временного сопротивления σ_B к пределу текучести материала σ_T .

Результаты расчета утонения $\Delta\delta$ детали были описаны аппроксимирующими зависимостями

$$\Delta\bar{\delta} = \frac{\Delta\delta}{\delta} = 1 - a\bar{r} - b,$$

$$\text{где } \begin{cases} a = \text{const} = 0,0888 \\ b = 1,288 - 0,329 \bar{\sigma}_B \end{cases} ; \quad \bar{\sigma}_B = \frac{\sigma_B}{\sigma_T} ; \quad \bar{r} = \frac{r_0}{\delta} = [0,5; 2].$$

На базе конечно-элементного моделирования изучалось влияние избытка длины полок W-образного полуфабриката на процесс утолщения стенки деталей в углах при формовке (Рисунок 2).

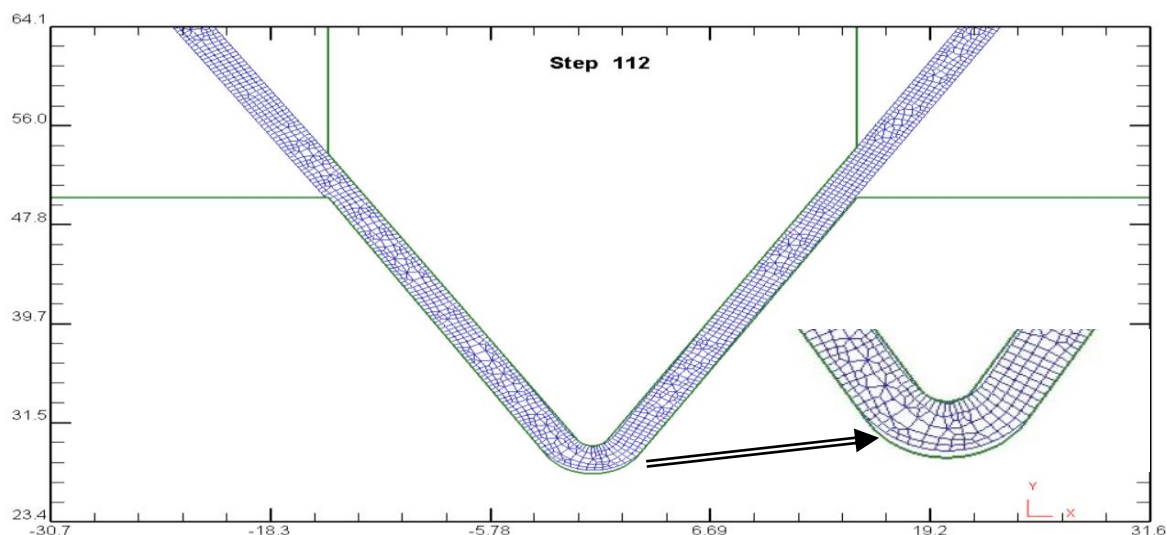


Рисунок 1.

Конечно-элементное моделирование утонения угла детали при её гибке на малый радиус

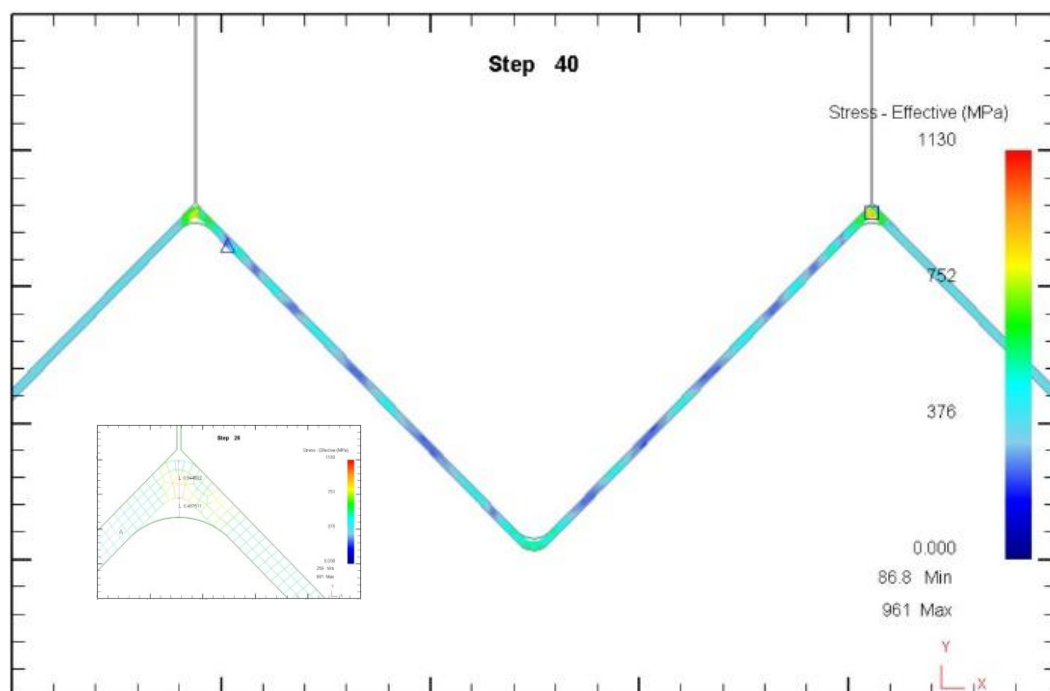


Рисунок 2.

Фрагмент конфигурации W-образного полуфабриката и распределение напряжений в стенке при обжиге в штампе

Моделировалось закрепление внешних полков полуфабриката в штампе на прессе двойного действия. Варьируемый избыток длины заготовки формировал зазор между матрицей и полуфабрикатом. Расчёты показали, что деформирование локализуется в области углов, и существует функциональная

связь между зазором и утолщением детали в углах. Но утолщение углов происходит неодинаково. Причина заключается в том, избыток металла на внутренних полках участвует в утолщении двух концов, а избыток на внешних полках только у одного конца. Эти соображения были положены в основу формул для расчёта утолщений в углах W-образных деталей.

Другим объектом изучения был процесс формирования волнистости, как следствие гофрирования полок полуфабриката при формовке, которая ограничивается требованиями конструкторской документации. В качестве модели для изучения выбран процесс косо обжатия пластины в штампе. Длина пластины соответствовала длине полки детали.

Расчеты показали, что гофрирование полок W-образного полуфабриката представляет собой сложный процесс, который зависит от относительного избытка длины заготовки $\Delta L/L$. На начальной стадии возникает две полуволны, а взаимодействие со стенками штампа порождает новые полуволны (Рисунок 3). Их появление разнесено во времени. Неодинакова также и скорость их развития. Установлено, что силы трения, действующие в точках касания гофров и инструмента, искажают симметрию картины деформирования.

Описание моментов образования и последующего развития полуволн вызывает значительные затруднения. Но для оценки параметров волнистости достаточно знать число полуволн и их амплитуду.

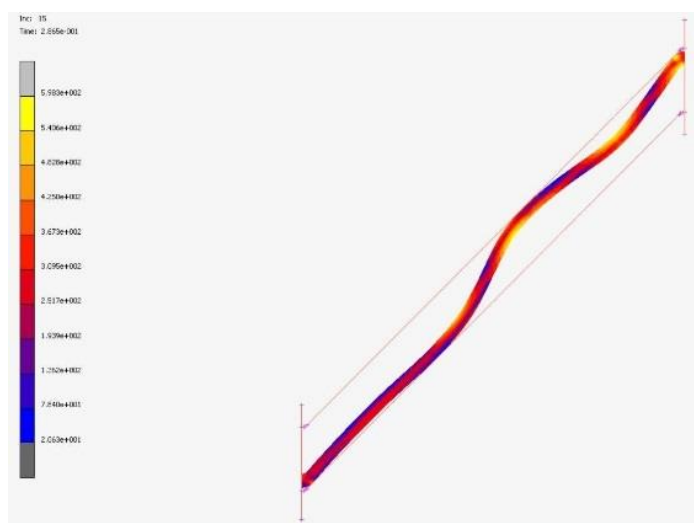


Рисунок 3.

Формирование третьей и четвертой полуволны в косо обжимаемой пластине

С помощью допущения о постоянстве длины нейтрального слоя полки при изгибе избыток длины заготовки был связан с числом полуволн и амплитудой. Это позволило получить формулы для работы деформирования при развитии гофров и при утолщении концов полки. С их помощью на диаграмме энергозатрат формовки полок построены кривые, соответствующие утолщению и образованию гофров (рис.4). Точки пересечения определяют границы областей, где образуется 2, 3, 4 полуволны.

При извлечении детали из штампа в соответствии с законом Гука происходит упругое восстановление гофров, которое характеризуется диаграммой на (Рисунок 5).

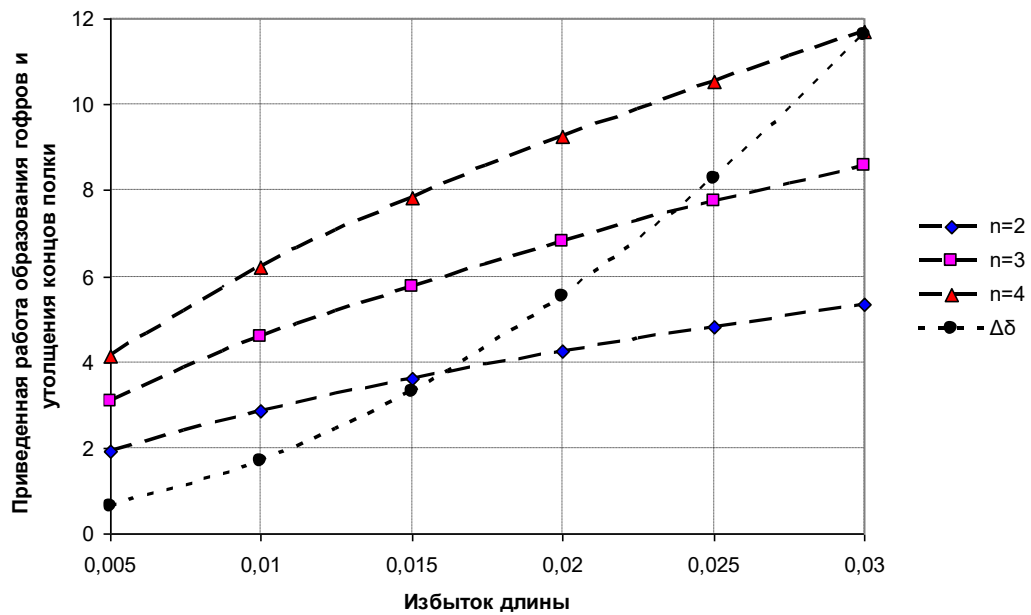


Рисунок 4.

Приведенные работы образования гофров между плоскостями штампа (ромбический, прямоугольный и треугольный маркеры для двух, трех и четырех полуволин) и работа утолщения (круглый маркер) концов пластины (полки детали) для стали 12Х25Н16Г7 как функция относительного избытка длины заготовки $\Delta L/L$

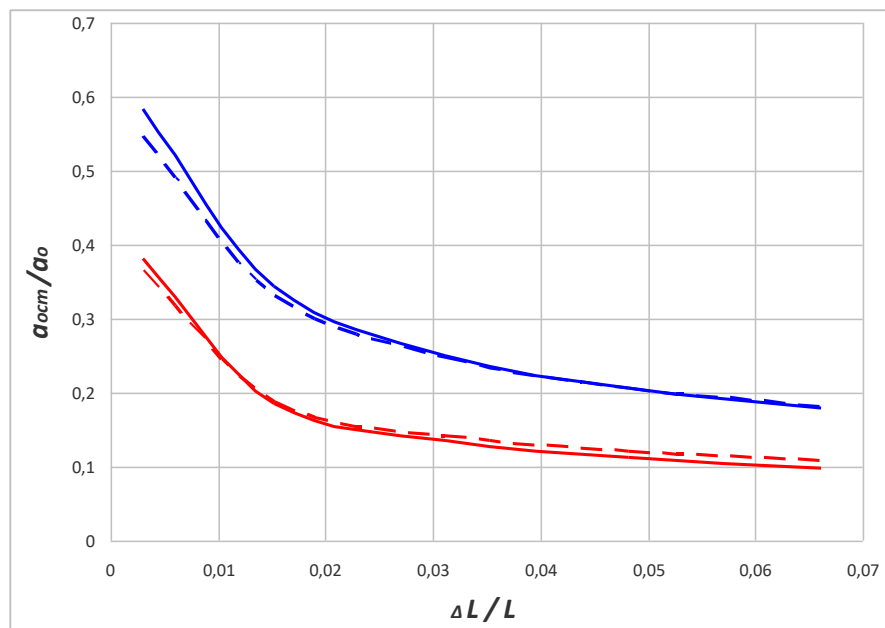


Рисунок 5.

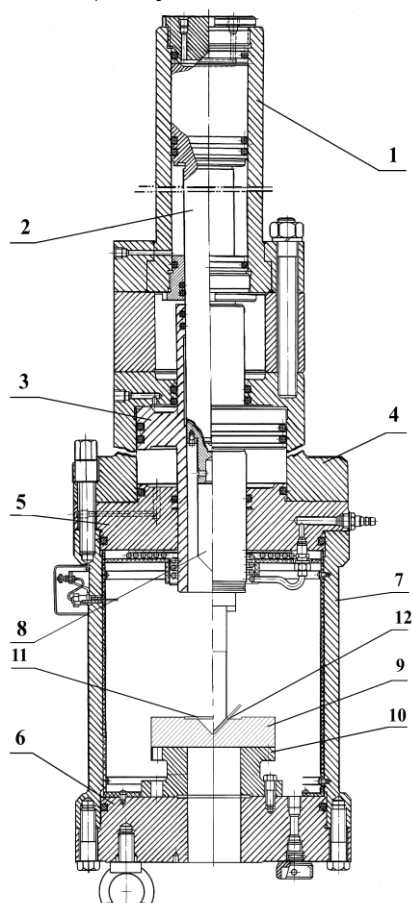
Отношение остаточной и исходной амплитуды полуволин гофров на полках детали

Здесь величины $a_0, a_{\text{ост}}$ - амплитуды гофров до и после снятия нагрузки на деталь. Синие и красные кривые получены соответственно для сталей 12Х25Н16Г7 и 30ХГСА. Сплошные и пунктирные линии построены соответственно для 2-х и 4-х полуволн.

Таким образом, предложенный подход позволяет оценить в зависимости от избытка длины заготовки искомые число волн и высоту профиля волнистости полок детали. Полученные результаты являются основой для выбора режимов и условий проведения операций штамповки W-образных деталей с утолщениями в углах, а также размеров заготовки и штампа.

В третьей главе проведены экспериментальные исследования процесса штамповки деталей W-образной формы с утолщением в углах.

Эксперименты проведены на гидравлическом прессе двойного действия 28Л30 (Рисунок 6).



а)



б)

Рисунок 6.

Гидропресс 28Л30: а) конструктивная схема; б) его фотография

Гидропресс имеет верхний цилиндр 1, центральный шток 2, полый периферийный шток 3, размещенный в цилиндре 4, верхнюю 5 и нижнюю 6 плиты пресса. Между верхней и нижней плитой пресса размещена бронекамера 7 с боковыми крышками-окнами (условно не показаны). В камере 7 размещается штамповая оснастка. Технические характеристики пресса:

максимальная сила со стороны центрального штока 300кН; максимальная сила со стороны периферийного штока 500кН; расстояние между верхним и нижним основанием пресса 375мм; внутренний диаметр бронекamеры 350мм; ход центрального штока 300мм; ход периферийного штока 106мм. Габариты окна камеры 250x210мм. Расстояние от нижнего основания пресса до нижнего положения центрального штока 75мм. К данному прессу была разработана и изготовлена штамповая оснастка для утолщения углов W-образных деталей.

Для оценки стабильности достижимого утолщения (воспроизводимости) была изготовлена партия из 21 заготовки, у которых толщина изменялась в узком диапазоне 0,81...0,82мм. После операций штамповки полуфабриката и его формовки в W-образную деталь осуществлялось измерение толщины детали в углах с помощью резьбового микрометра. Результаты измерения утолщений, представленные в таблице 1 с указанием вероятности появления в различных диапазонах, показали стабильность роста толщины в углах деталей W-образной формы из стали 12Х25Н16Г7. Их анализ показал, что с вероятностью 86% утолщение в углах составляет $\frac{\Delta\delta}{\delta} = 35,8\%$. Эксперименты также подтвердили, что утолщения во внешних углах больше, чем во внутренних.

Таблица 1

Результаты измерения толщины в углах деталей W-образной формы из стали 12Х25Н16Г7.

№ разряда	Толщина в вершине, мм	Вероятность события, %
1	0,96 – 1,0	4,76
2	1,0 - 1,04	9,52
3	1,04 - 1,08	28,57
4	1,08 - 1,12	23,8
5	1,12 - 1,16	33,3

Аналогичные эксперименты были проведены с заготовками толщиной 0,6мм и также показали высокую эффективность предложенной технологии утолщения углов W-образных деталей.

В завершающей стадии экспериментальных исследований проведен анализ волнистости полок детали с помощью профилометра БВ-7669И, который автоматически фиксировал профиль волнистости на длине 10мм. Поскольку длина полок значительно больше длины измерения, в работе была использована методика склейки фрагментарных измерений. Наблюдаемое образование четырех полуволн на интегрированном контуре полки (Рисунок 7), а также высота профиля волнистости подтверждает выводы теоретического анализа. Для подтверждения достоверности выводов о волнистости полок измерения были повторены на пьезосканирующем приборе Surfiew Elite 2900Е.

В четвертой главе разработана методика расчета размеров заготовки и штампа для изготовления W- образных деталей с утолщением в углах, которые обеспечивают требования к ширине площадки стыка и допуск на волнистость полок. Алгоритм её применения:

- Условие возможности получения площадки стыка между собираемыми деталями дает радиусы скругления вершин матрицы и пуансона (необходимое условие)

$$r_0 \leq \frac{\delta}{\sqrt{2}} \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}-1} \right),$$

где δ - толщина заготовки, $\Delta\delta$ - изменение толщины детали в углах, r_0 - радиус при вершине пуансона.

- Назначение утолщения в углах детали осуществляется с помощью формулы, связывающей требуемую ширину площадки стыка S , толщины детали и радиус при вершине пуансона

$$S = 2 \left\{ \left[r_0 + \delta \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta} \right) \right]^2 - 2 \left[r_0 + \frac{\delta}{2} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

- С помощью предложенной диаграммы (Рисунок 8), которая получена на основе результатов теоретических исследований главы 2, определяется избыточная длина заготовки по утолщению в углах детали. Одновременно устанавливается число возникающих при обжатии полуволн.
- С помощью диаграммы (Рисунок 9), которая также получена на основе результатов теоретических исследований главы 2, по величине избыточной длины заготовки определяется высота профиля волнистости W_i/L и сравнивается с уровнем допуска на эту величину.

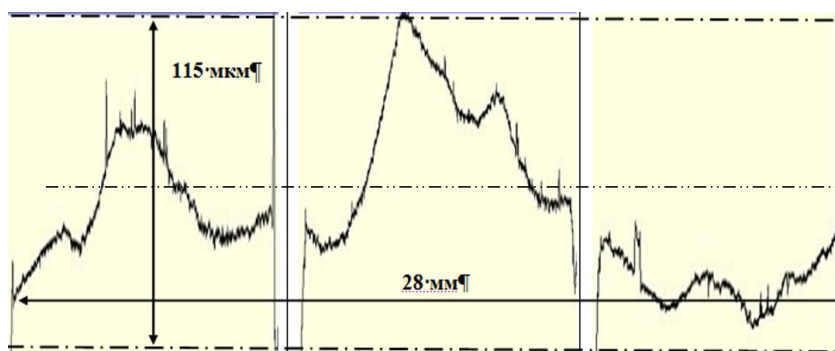


Рисунок 7

Интегрированный профиль волнистости, составленный из 3-х зон

Так проверяется возможность получения изначально заданной ширины площадки стыка с помощью предложенной технологии.

Вторым этапом методики проектирования операций листовой штамповки W- образных деталей с утолщением в углах является обоснование сил на центральном и боковых пуансонах, необходимых для формообразования W- образных деталей. Смещение нейтрального слоя при гибке вызывает дисбаланс

сил растяжения и сжатия в сечении заготовки, что может приводить к изменению угла раствора детали.

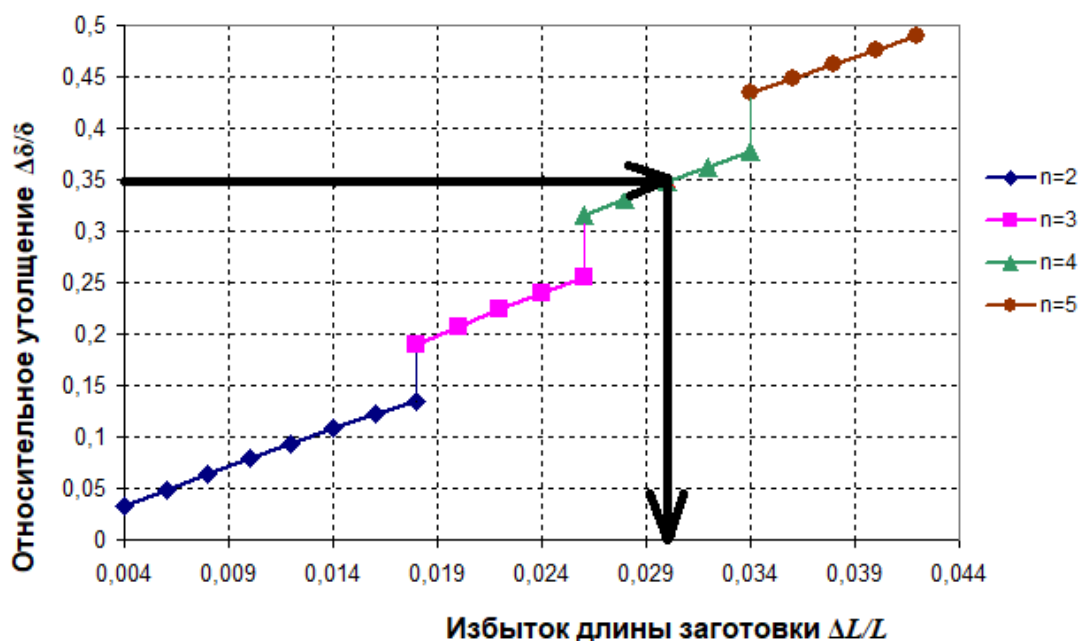


Рисунок 8

Диаграмма для выбора длины заготовки по величине относительного утолщения в углах детали

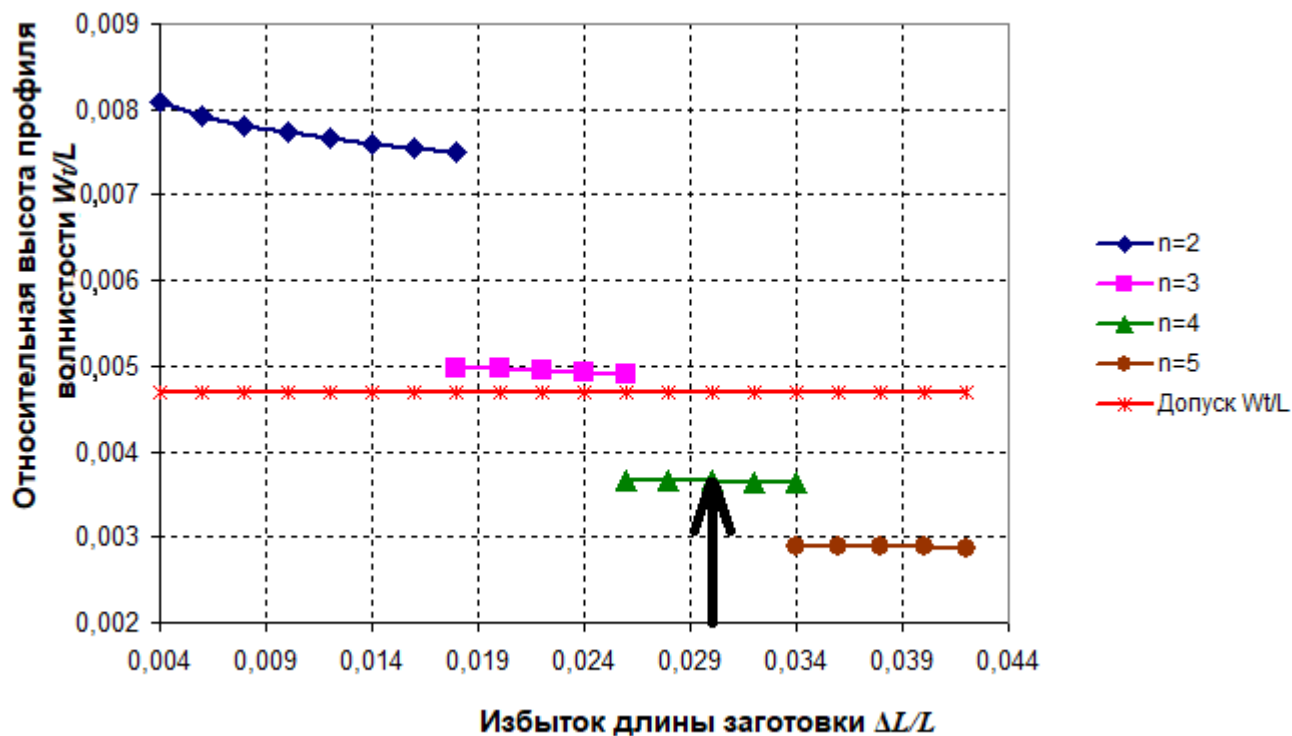


Рисунок 9

Диаграмма для проверки выполнения требования к волнистости полок детали

Для борьбы с этим явлением, как показано на (Рисунок 10), следует увеличить уровень поперечных напряжений σ_n , возникающих в детали под действием центрального пуансона. Здесь синяя, малиновая и красная кривые соответствуют $\sigma_n = 0; 200; 400$ МПа. С учетом этого явления и возможностей прессы была выбрана сила контактного воздействия центрального пуансона на деталь в 200 кН. Из условия предотвращения проскальзывания боковых полок детали между плитами штампа выбрана сила прижима 140кН.

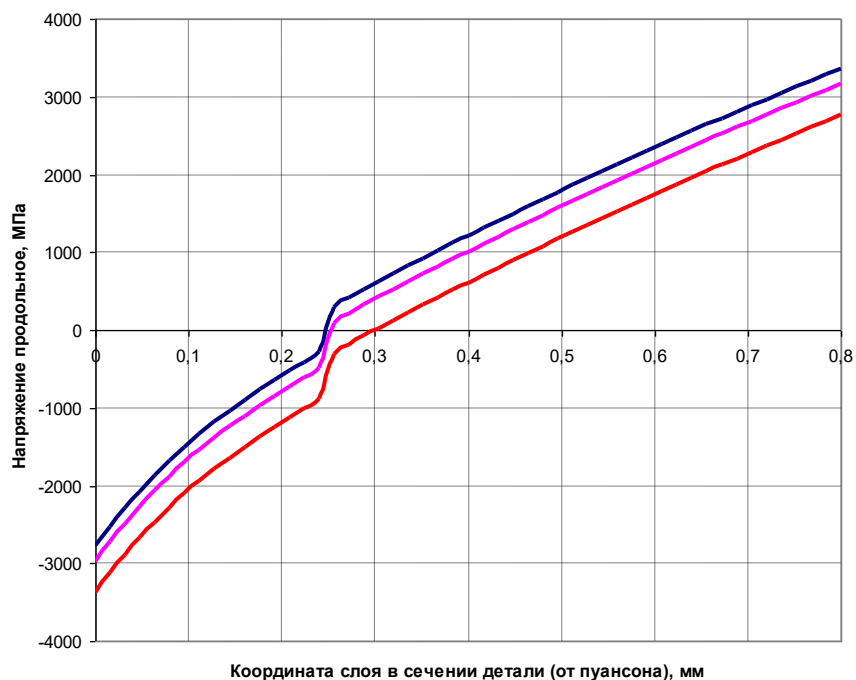


Рисунок 10

Распределение продольных напряжений в сечении у вершины пуансона: синяя, малиновая и красная кривые соответствуют $\sigma_n = 0; 200; 400$ МПа

Результаты работы были использованы в производстве сотовых решетчатых конструкций при разработке технологии штамповки деталей ломаного контура. В частности, была разработана конструкция штамповой оснастки для операций технологии утолщения в углах W-образной детали (Рисунок 11).

Предложены рекомендации по выбору размеров заготовки и штамповой оснастки, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Рекомендации по размерам заготовки и штампа
для обеспечения утолщения в углах W-образной детали

Тип рекомендации	Величина	Тип рекомендации	Величина
Толщина листового материала	0,8мм	Сила на боковых пуансонах	140кН
Радиус при вершине пуансона	0,2мм	Общая длина заготовки	141мм
Сила на центральном пуансоне	200кН	Углы в штампе для первой операции	84°

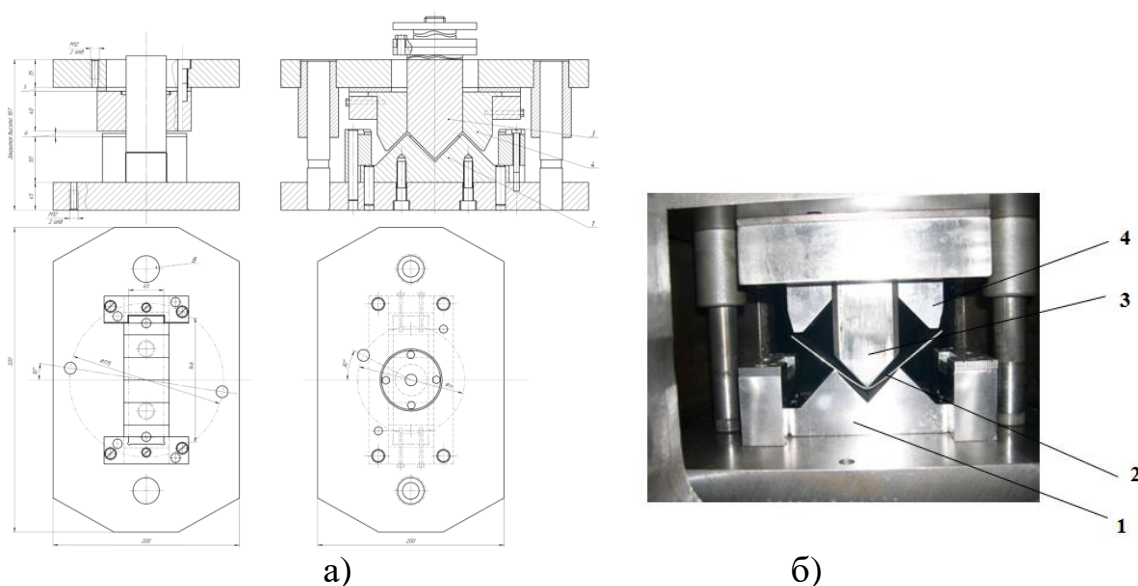


Рисунок 11

Конструкция штампа для изготовления W-образных деталей (а. – сборочный чертеж; б. – фотография штампа): 1-матрица; 2-заготовка; 3,4-центральный и боковой пуансоны

Практическое использование рекомендаций обеспечило в опытно-промышленном производстве выполнение требований КД к W-образным деталям для сотовых конструкций.

Основные выводы

1. На базе анализа существующих способов утолщения в углах деталей ломаного контура предложена технология изготовления деталей W-образной формы с утолщением в углах, которая состоит из 2-х операций листовой штамповки, выполняемых на прессе двойного действия. На 1-й операции при гибке W-образного полуфабриката создается избыток материала. На 2-й операции осуществляется формовка центральной части детали с утолщением в углах. Новизна технологического способа подтверждена патентом на изобретение.

2. Теоретический анализ и конечно-элементное моделирование показали, что избыточная длина заготовки вызывает образование гофров на полках W-образной детали при её формовке с утолщением и является причиной формирования волнистости.

Применение энергетического подхода при теоретическом анализе результатов конечно-элементного моделирования позволило определить число волн и высоту профиля волнистости, которая регламентируется в конструкторской документации.

3. Проведенные экспериментальные исследования показали, что предложенная технология обеспечивает утолщение стенки W-образной детали на 35,8% с вероятностью 86%. Эксперименты показали также, что предложенная технология сохраняет свою эффективность и при уменьшении толщины заготовки с 0,8мм до 0,6мм.

Установлено, что специфика использования избытка длины заготовки в выбранной технологической схеме являются причиной того, что в центральном угле W-образной детали утолщение оказывается на 24% меньше, чем в периферийных углах.

Измерениями на профилометре БВ 7669 доказано, что при относительном избытке длины заготовки 0,03 для W-образных деталей толщиной 0,8мм и длиной полок 34мм волнистость полок не превышает 120 мкм. При этом на полке образуется 4 полуволны. Измерения параметров волнистости подтвердили выводы теоретических исследований.

4. Применительно к производству решетчатых (сотовых) конструкций с квадратной ячейкой разработана методика выбора геометрических параметров заготовки и штампа, которые обеспечивают: требуемое расположение плоскостей в сотовой конструкции; утолщение углов W-образной детали для увеличения площадки стыка между деталями; соблюдение требований к высоте профиля волнистости.

Обоснована величина сил на плунжерах прессы двойного действия для проведения операций гибки полуфабриката и формовки детали W-образной формы с утолщением в углах.

5. В рамках опытно-промышленной апробации методики выбора технологических параметров листовой штамповки W-образной детали на предприятии ООО «Техноцит» для производства деталей с толщиной 0,8мм были выбраны: длина заготовки 140мм; назначен радиус скругления вершин штампа 0,2мм; рассчитаны углы штампа 84° , обеспечивающие формовку заготовки с требуемым избытком длины. Путем расчёта установлено, что для обеспечения точности формы детали центральный пуансон на прессе двойного действия должен развивать силу 200кН, а боковые пуансоны – 140кН. Был разработан, изготовлен и применен в производстве штамп.

Методика использована также при разработке технологических процессов изготовления деталей ломаного контура из листовых материалов на предприятии АО «НПО «Техномаш».

Материалы диссертации изложены в следующих основных работах:

1. Боярский Д.С. Методика анализа базы диаграмм напряженно-деформированного состояния в программно-математической среде Deform – 3D для изучения процессов пластического деформирования материалов // Политехнический молодежный журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2020. №2. (Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС77-65907). DOI: 10.18698/2541-8009-2020-2-581.
2. Аппроксимация диаграмм деформирования сталей по их механическим характеристикам / Д.С. Боярский [и др.] // Черные металлы, 2020, № 8. С. 59-63. (0,7 п.л./ 0,35 п.л.).
3. Утонение стенки в вершине детали уголкового формы при гибке в инструментальном штампе / Д.С. Боярский [и др.] // Технология металлов. 2021. № 4. С. 22-27 (0,5 п.л./ 0,25 п.л.).
4. Аппроксимация диаграмм деформирования металлических материалов при воздействии высокого гидростатического давления / Д.С. Боярский [и др.] - Деформация и разрушение материалов. 2021, №7, С. 23-29. (0,6 п.л./ 0,3 п.л.).
5. Численный анализ эволюции процесса гофрообразования при косом обжатии пластины в условиях гибки уголкового детали / Д.С. Боярский [и др.] // Известия ВУЗов. Сер. Авиационная и ракетно-космическая техника. 2022. №9. С.92-99 (0,8 п.л./ 0,5 п.).
6. Влияние трения и упругого восстановления формы на развитие гофров при косом сжатии пластины в штамповой оснастке/ Д.С. Боярский и др. - Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2023. №2 (142) (0,8 п.л./ 0,5 п.л.) (список ВАК РФ).
7. Wall Thinning at the Vertex of an Angle Piece for Bending in a Tool Die / D. Boyarskii [et al.] // Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2021, No. 13, pp. 1738–1742. (0,5 п.л./ 0,25 п.л.).
8. Approximation of the Stress–Strain Curves of Metallic Materials Subjected to a High Hydrostatic Pressure / D. Boyarskii [et al.] // Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2022, No. 4. P. 375–379 (0,6 п.л./ 0,3 п.л.).
9. Способ изготовления профилей W- образного сечения из листовых заготовок: пат. № RU 2791199 С1 / Д.С. Боярский [и др.]; заявл. 11.02.2022. опубл. 03.03.2023.
10. Боярский Д.С., Баскаков В.Д. Методика приближенной оценки утонения детали уголкового формы при гибке в инструментальном штампе // Сборник докладов, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. М.: XLIV Академические чтения по космонавтике. Москва. 2020. С. 399-401. (0,1п.л./0,03п.л.).
11. Боярский Д.С., Баскаков В.Д. Варианты расчёта параметров диаграмм деформирования металлических сплавов при воздействии высоких температур и гидростатического давления // Труды V Международной научно-технической конференции «Новые материалы, подходы и

технологии проектирования, производства и эксплуатации ракетно-космической техники» в сб. докл. Москва. 2021. М.: Издат. дом «Спектр». С.11-12. (0,1п.л./0,03п.л.).

12. Боярский Д.С., Баскаков В.Д. Образование гофров при переформовке вершины детали уголкового формы: доклад // Труды V Международной научно-технической конференции «Новые материалы, подходы и технологии проектирования, производства и эксплуатации ракетно-космической техники» в сб. докл. Москва. 2021. М.: Издат. дом «Спектр». С.140-141. (0,1п.л./0,03п.л.).
13. Боярский Д.С., Баскаков В.Д. Гофрообразование при косом сжатии пластины в инструментальном штампе с учетом влияния сил трения и контактного напряжения // Сборник тезисов, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. М.: XLVII Академические чтения по космонавтике. Москва. 2023. С. 358-360. (0,1п.л./0,03п.л.).