

На правах рукописи



Мироненко Владимир Витальевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ ЭЛЕМЕНТА ТИПА
«ПОДСЕЧКА» НА ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВКАХ
ПОДВИЖНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ОСНАСТКИ**

Специальность 05.07.02

Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2021

Работа выполнена на кафедре технологии и оборудования машиностроительных производств ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Научный руководитель: **Шмаков Андрей Константинович**,
кандидат технических наук, доцент кафедры
нефтегазового дела ФГБОУ ВО «Иркутский
национальный исследовательский
технический университет», г. Иркутск

Официальные оппоненты: **Моисеев Виктор Кузьмич**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры производства
летательных аппаратов и управления
качеством в машиностроении ФГАОУ ВО
«Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С.П. Королева» (Самарский
университет), г. Самара

Бобин Константин Николаевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры
самолето- и вертолетостроения ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный
технический университет», г. Новосибирск

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Балтийский государственный
технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «17» марта 2021 г. в 9:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.06 при ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте www.knastu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах (заверенных печатью учреждения) просим присылать по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», ученому секретарю диссертационного совета Д 212.092.06

Автореферат разослан « » января 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.092.06
кандидат физико-математических наук



Д.А. Потянихин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Листовая штамповка является одной из основных разновидностей обработки металлов давлением, которая позволяет получать плоские и пространственные детали из самых разнообразных материалов и самых разнообразных конфигураций. Тонкостенные конструкции из листа получают широкое применение в самых разнообразных изделиях машиностроения. Высокие эксплуатационно-прочностные качества тонкостенных деталей и узлов из листа при минимальном весе последних определяют еще большее их применение в изделиях машиностроения. В связи с этим экономичное и высокопроизводительное производство качественных тонкостенных деталей, особенно сложных форм, является одной из важных проблем современного машиностроения. Большое значение приобретает совершенствование существующих и разработка новых процессов штамповки деталей из листа.

Процессы листовой штамповки эластичной и жидкостной средой вследствие их универсальности, удобства осуществления, простоты используемого при этом инструмента, а также исключительно больших технологических возможностей обеспечивают значительное снижение себестоимости, повышение качества и надежности промышленной продукции не только при массовом, но и серийном, мелкосерийном и опытном производстве. Можно с уверенностью сказать, что существование современного машиностроения практически немыслимо без широкого применения процессов листовой штамповки эластичными и жидкостными средами и в первую очередь процессов штамповки резиной и жидкостью.

Формообразование деталей с разными конструктивными элементами как в плоскости стенки, так и на бортах приводит к появлению дефектов. Наиболее распространённым элементом жесткости и элементом, обеспечивающим стыковку деталей при сборке, является подсечка. Остро стоит вопрос производства листовых деталей с элементами «подсечка». Для устранения дефектов «недоштамповка» и «гофрообразование» на таких деталях используется ручная доводка деталей с большой трудоемкостью. В результате доводки детали в одном месте уходит контур всей детали и, как результат, приходится доводить всю деталь. Также при ручной доводке теряется смысл учета пружинения в оснастке, так как при доводке деталь в районе подсечки полностью копирует форму с оснастки, имеющей номинальные размеры.

Данная проблема сохраняется даже на современном оборудовании с большим давлением (100 МПа и более). Основная проблема заключается в возникновении избыточной жесткости в районе вершины при формообразовании «подсечки» эластичной средой.

Степень разработанности темы исследования.

В нормативном документе ОСТ 1.52468-80 показана основная проблема и ограниченность в формообразования подсечек. Исходя из этого нормативного документа видны типы подсечек, которые нуждаются в разработке новых технологий формообразования для их изготовления и устранения дефектов, возникающих при изготовлении. В работах Исаченкова Е.И. предлагаться основные методики расчета напряженно-деформированного состояния, утонения и потребного давления при формообразовании подсечек эластичной средой. Видно, что данные методики подходят только для стандартных подсечек и, если рассматриваются подсечки, выходящие за номограмму ОСТ 1.52468-80, то необходима разработка новых методик расчета для основных технологических характеристик. Также в работах Исаченкова Е.И. не рассматривается формообразование подсечек на деталях из трудно-деформируемых сплавов и при высоких давлениях (выше 40 МПа). В нормативном документе ОСТ 1.41466-73 и ОСТ 1.51728-73 показаны способы устранения дефектов типа «недоштамповка» и «гофрообразование» при формообразовании подсечек. Однако все эти способы не дают стабильное устранения дефектов и не учитывают новые свойства материалов.

Для решения данных задач необходимо разработать новую технологию формообразования подсечек и разработать методики расчета основных параметров процесса формообразования. Для подтверждения работоспособности предложенных методик нужно провести натурные эксперименты, а также провести имитационное моделирование. Данное сравнение подтвердит работоспособность предлагаемой технологии.

Работы Михайлова Ю.О., Дресвянникова Д.Г., Князева С.Н., Ефимова Н.А., Федотова Ю.В. показывают методики расчета минимальной толщины и напряжения при деформировании гидроэластичной средой и полиуретаном. В работах Lin J.I., Tsay C.S, Колесникова А.В., Ершова А.А., Максименко Н.В., Осипова С.А. рассмотрены постановки задачи моделирования формообразования листовых заготовках методом конечных элементов. Также в работах Орлова Г.А., Котова Г.А., Замараевой Ю.В., Логинова Ю.Н., Аксенова С.А., Чумаченко Е.Н, Захарьевой И.Ю., Марьина С.Б., Куриная Н.П. рассмотрены примеры решения контактной задачи при конечно-элементном моделировании листовой штамповки. Кроме того, в работах Лавриненко В.Ю., Соловьева Б.М., Шукшина А.В., Баженова В.Г., Павленковой Е.В., Желтикова С.А., Сурудина С.В., Ерисова Я.А. рассмотрены граничные условия (нагрузка и закрепления) для задач деформирования листовых заготовок. Все вышеописанные работы использовались для разработки новых методик расчета формообразования для предлагаемой технологии и проведения ее конечно-элементного моделирования

Целью диссертационной работы является изучить технологические возможности нового способа формообразования подсечек эластичной средой, позволяющего обеспечить их бездефектное образование на листовой детали и сформулировать рекомендации по реализации этого способа.

Задачи исследования:

1. Разработать новый способ формообразования, обеспечивающий бездефектное образование подсечек на листовых деталях эластичной средой.
2. Разработать методику расчета основных параметров процесса формообразования подсечек.
3. Разработать уравнения, описывающие конфигурацию контактной поверхности подвижного прижима для разных типоразмеров подсечек.
4. Разработать методику расчета потребной площади контактной поверхности подвижного прижима исходя из параметров подсечки и характеристик оборудования для формообразования.
5. Провести экспериментальную проверку работоспособности предложенного способа формообразования подсечек и адекватности разработанных методик расчета.

Научная новизна исследования заключается в предложении нового способа формообразования с применением подвижного прижима и методик проектирования комплекта оснастки для формообразования разного типоразмера подсечек. Данная технология позволяет осуществить перевод усилия эластичной среды на подвижный прижим, который будет передавать повышенное усилие локально на проблемную зону и обеспечивать в ней условия напряжено-деформированного состояния близкого к условиям всестороннего сжатия. Максимальный эффект от подвижного прижима может быть получен при осуществлении его движения во время формообразования. Перемещение подвижного прижима при окончательной формовке обеспечивает достаточное силовое воздействие на деформируемую зону детали для исключения «недоштамповки» и «гофрообразования».

Теоретическая значимость работы состоит в разработке новых методик расчета для формообразования подсечек и процессов их бездефектного формообразования. Также будут разработаны теоретические основы анализа и выбора параметров дополнительных элементов оснастки для бездефектного формообразования подсечек.

Практическая значимость работы заключается в разработке способа формообразования, обеспечивающего устранение дефектов типа «недоштамповка» и «гофрообразование», появляющихся на листовых деталях в зоне подсечек, а также расширение диапазона допустимых типоразмеров подсечек, а кроме того сокращение трудоемкости

изготовления деталей с подсечками при обеспечении требуемого качества поверхности и достижения заданной точности. В свою очередь появляется возможность формообразования деталей сложной формы с подсечками из труднодеформируемых сплавов без нагрева.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач, использовалась совокупность методов численного решения интегралов, метод наименьших квадратов, метод конечных элементов, теория исследования функций, теория интерполирования и приближения функций, а также численно-аналитические методы теории обработки металлов давлением. Для имитационного моделирования использовался конечно-элементный программный комплекс ESI Group RAM-STAMP 2G, а для аналитических расчетов использовался математический пакет MathCAD фирмы PTC.

Положения, выносимые на защиту.

1. Технология формообразования с подвижным прижимом устраняющий дефект «недоштамповка» и «гофрообразование»;
2. Уравнение приводящей поверхности подвижного прижима для правой и левой части номограммы;
3. Методика расчета утонения и деформации утонения в зоне подсечек исходя из допущений формулы Брахмагупты;
4. Методика расчета полной деформации формообразования для правой и левой части номограммы;
5. Методика расчёта потребной площади приводящей поверхности подвижного прижима исходя из параметров подсечки и характеристик оборудования для формообразования;
6. Методика расчета для определения потребного давления на первом переходе для правой части номограммы.

Степень достоверности научных положений и выводов, приведенных в работе, подтверждается почти точным совпадением результатов расчётов по предлагаемым методикам расчета, с результатами имитационного моделирования в конечно-элементном комплексе и натурных экспериментов. Проведение натурных экспериментов на разных деталях и из разных материалов показывает хорошую верификацию результатов предлагаемых расчетов, конечно-элементного моделирования и натурных экспериментов.

Апробация работы. Основные результаты научно-квалификационной работы (диссертации) были представлены на научно-технических конференциях:

- научно-практическая конференция «Молодежь. Проекты. Идеи» (г. Иркутск, 2015 г.) в направлении «Подготовка производства», диплом за первое место;
- всероссийская научно-практическая конференция "Авиамашиностроение и транспорт Сибири" (г. Иркутск, 2016 г.);

- Международная научно-практическая конференция «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы исследования, опыт внедрения и перспективы развития» (г. Ульяновск, 2016 г.);
- научно-практическая конференция «Молодежь. Проекты. Идеи» (г. Иркутск, 2017 г.) в секции «Подготовка производства», диплом за второе место;
- III Всероссийский конкурс студенческих научных обществ и конструкторских бюро (г. Барнаул, 2017 г.) в номинации «Робототехника, моделирование и электроника», диплом первой степени;
- конкурс научно-инновационных проектов «Молодой изобретатель» в рамках Всероссийского фестиваля науки (г. Иркутск, 2017 г.), первое место;
- X Международная конференция «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (г. Иркутск, 2018 г.);
- Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2018» (г. Севастополь, 2018 г.);
- конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (г. Москва, 2018 г.) в номинации «Новые материалы и производственные технологии в области авиационной и ракетно-космической техники», первое место;
- конкурс научно-инновационных проектов «Молодой изобретатель» в рамках Всероссийского фестиваля науки (г. Иркутск, 2018 г.) в номинации «Лучший инновационный проект», первое место;
- научно-практическая конференция «Молодежь. Проекты. Идеи» (г. Иркутск, 2019 г.) в секции «Производство», диплом за второе место.

Публикации. По материалам исследований опубликовано 19 работ:

- 6 публикаций в изданиях из перечня ВАК;
- 7 публикаций в изданиях, входящих в перечень справочной информации об отечественных изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования и в соответствии с пунктом 5 правил формирования перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук;
- 6 публикаций в прочих изданиях.

Личный вклад автора. Автор диссертации, является непосредственным разработчиком предлагаемой технологии, внес большой творческий вклад в работу и все представление результаты по натурным и виртуальным отработкам проводились автором лично. Также

автором лично проведены все математические расчеты и выведены формулы для технологических характеристик предлагаемой технологии.

Соответствие паспорту специальности.

Научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, соответствуют трём пунктам паспорта специальности 05.07.02 – «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов» (технические науки).

П.11. Технологические процессы, специальное оборудование для изготовления деталей летательных аппаратов, включая технологию:

- изготовления деталей обработкой давлением (ковка, штамповка и др.).

П.15. Технологические процессы проектирования, программирования и информационного обеспечения при производстве летательных аппаратов, двигателей и их составных частей, включая технологию и средства:

- автоматизированного проектирования технологических процессов и управления ими;
- математического моделирования технологических процессов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа имеет следующую структуру: введение, четыре главы, заключение, список литературы. Полный объем работы (диссертации) составляет 208 страниц, содержит 11 таблиц, 166 рисунков, 100 наименований списка ссылочной литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована актуальность проведенных научных исследований, также проанализировано современное состояние проблемы выдвинутой автором. Сформулировано видение решения данной проблемы.

В **первой главе** рассмотрены проблемы, связанные с формообразованием подсечек. Выявлено, что наиболее серьезные проблемы возникают при формообразовании боковых подсечек и то, что при их формообразовании возникают следующие основные дефекты: «гофрообразование»; «недоштамповка»; разрыв в вершине.

Проанализирован ОСТ 1.52468-80, в котором указаны рекомендуемые области соотношений характеристик для формообразования подсечки и зоны увеличения вероятности появления дефектов на номограмме. Однако при ближайшем рассмотрении выявлены серьезные ограничения в использовании данного нормативного документа в современных условиях и отсутствие гарантии бездефектного

формообразования подсечки даже в рекомендуемой зоне формообразования.

Рассмотрен ОСТ 1.51728-73, в котором освещена технология формообразования подсечек для устранения дефектов «гофрообразование» и «недоштамповка». Основными проблемами при использовании данной технологии являются недостаточность давления оборудования для обеспечения качественного формообразования подсечки с рекомендованными параметрами и необходимость использования большого количества наборов прижимных опор.

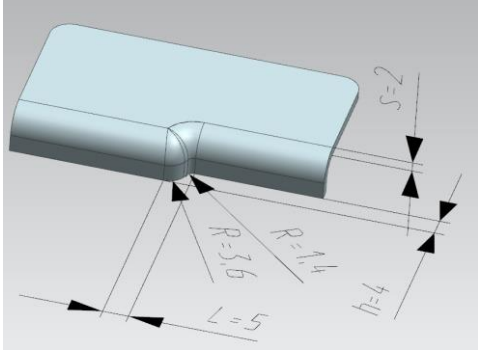
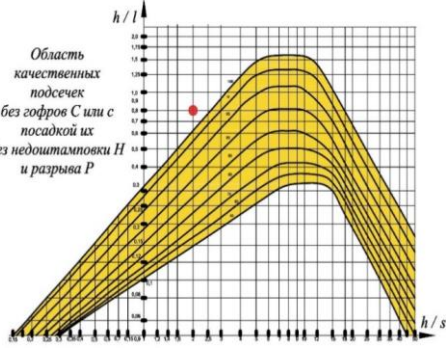
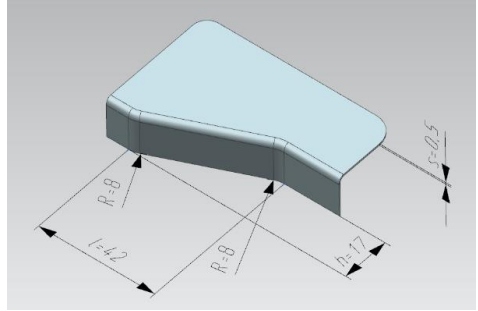
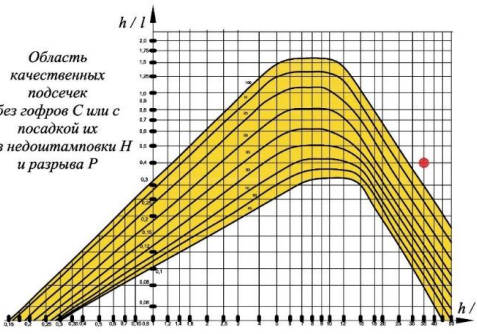
Проанализирован ОСТ 1.41466-73, в котором описываются рекомендации по штамповке листовых подсечек эластичной средой с помощью эластичных накладок с определенной твердостью. Основным недостатком этой технологии состоит в том, что нужно иметь большую номенклатуру типоразмеров эластичных накладок, и устранение дефекта «недоштамповка» может потребовать очень большого давления.

В настоящей работе рассмотрены существующие математические модели, методы и технологии формообразования, которые предложили Исаченков Е.И., Ефимов Н.А., Замаева Ю.В., Логинов Ю.Н., Захарьев И.Ю., Аксенов С.А., Марьин С.Б., Куриный В.В., Желтиков С.А., Сурудин С.В., Ерисов Я.А.

Изучение существующих работ авторов, компетентных в направлении исследования, позволило сформулировать цель и задачи научно-квалификационной работы (диссертации). Они заключаются в изучении технологических возможностей нового способа формообразования подсечек эластичной средой, позволяющего обеспечить их бездефектное образование на листовой детали и сформулировать рекомендации по реализации этого способа.

Во второй главе проанализировано применение методик, описанных в первой главе, для конкретных трех деталей. Было показано, что данные методики применимы для деталей, которые входят в рекомендуемую зону формообразования ОСТ 1.52468-80. В частности, на примере детали №1, входящей в рекомендуемую зону формообразования, было показано, что данные методики применимы и дают рассчитать необходимые технологические параметры (поэтому детали №1 не рассматривается подробно в автореферате). На примере детали №2 и детали №3 (которые не входят в рекомендуемую зону формообразования) была показана невозможность использования методик ОСТ 1.52468-80 (таблица 1).

Таблица 1 – Детали для анализа (приведены детали №2 и №3)

Эскиз и материал детали	Положение на номограмме
Деталь №2	
 Материал Д16АМ	
Деталь №3	
 Материал Д16АМ	

По детали №2 исходим из допущения, что площадь поверхности, построенной на основе четырех вершин и кривой, принадлежащей вершине подсечки, является площадью для получения подсечки до формообразования. Также считаем, что, отношение площади подсечки к площади построенной поверхности является деформацией, характеризующей утонение. Данное допущение взято из того, что формообразование будет производиться жестким инструментом, воздействующим на зону подсечки, и схема формообразования при этом напоминает вытяжку очень малой глубины с зажатым фланцем. Следовательно, справедливо условие постоянства объемов детали и заготовки, но не справедливо равенство площадей, так как фланец зажат. Выведена формула (1) для нахождения минимальной толщины с использованием формулы Брахмагупты (рисунок 1, таблица 1)

$$S_{i(\min)} = \frac{S_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a^2 \cdot b^2 - a^4 + 2 \cdot a^2 \cdot c^2 + 2 \cdot a^2 \cdot d^2 + 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d - b^4 + 2 \cdot b^2 \cdot c^2 + 2 \cdot b^2 \cdot d^2 - c^4 + 2 \cdot c^2 \cdot d^2 - d^4}{2 \cdot a^2 \cdot b^2 - a^4 + 2 \cdot a^2 \cdot c^2 + 2 \cdot a^2 \cdot d^2 + 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d - b^4 + 2 \cdot b^2 \cdot c^2 + 2 \cdot b^2 \cdot d^2 - c^4 + 2 \cdot c^2 \cdot d^2 - d^4}}}{\sqrt{2 \cdot a^2 \cdot b^2 - a^4 + 2 \cdot a^2 \cdot c^2 + 2 \cdot a^2 \cdot d^2 + 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d - b^4 + 2 \cdot b^2 \cdot c^2 + 2 \cdot b^2 \cdot d^2 - c^4 + 2 \cdot c^2 \cdot d^2 - d^4}} \quad (1)$$

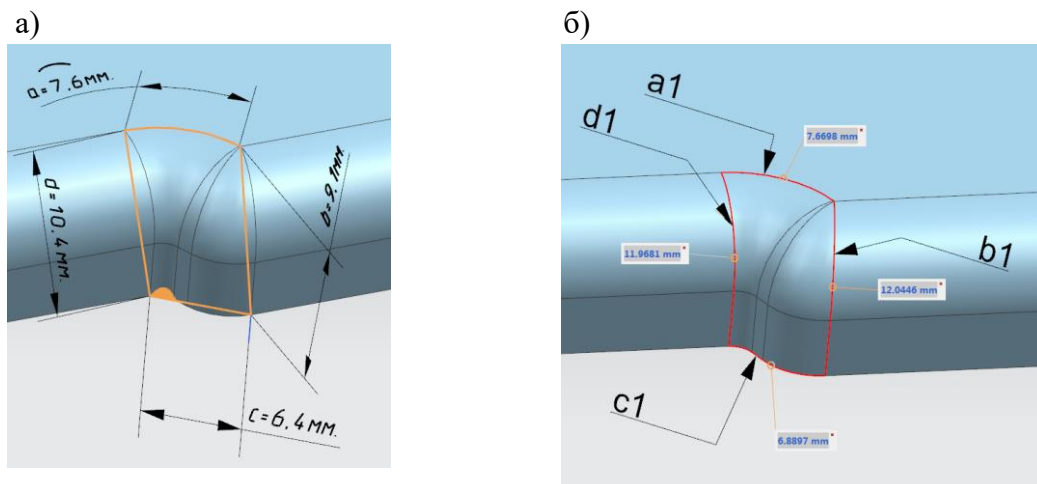


Рисунок 1 – Поверхности для расчета утонения

- а) – поверхность, построенная на основе четырех вершин;
 б) – поверхность подсечки

Из тех же допущений была найдена полная деформация в подсечной зоне. Используя эту деформацию, с помощью функции «Krupkowsky law» были найдены напряжения в детали при формообразовании. Рассчитанное по классическим формулам, описанным в главе 1, требуемое давление превышает значения формообразующих усилий прессов на сегодняшний день. Однако эти формулы исходят из того, что формообразование идет только эластичной средой. Из-за этого при расчете получаются большое давление. Данный аспект показывает, что без дополнительных элементов оснастки, которые помогут увеличить формообразующее воздействие, такая подсечка не может быть создана. Для формообразования данной подсечки нужно локализовать усилие формообразования на площади подсечки. Если предположить, что формообразование подсечки идет жестким инструментом (повторяющий контур подсечки) приводимым в движение за счет давления эластичной среды, то формообразование подсечки можно разбить на несколько этапов. Зная напряжения формообразования и суммарную площадь формообразования, можно найти требуемое усилие формообразования данной подсечки и, следовательно, требуемое давление формообразования в зависимости от площади воздействия на подвижный элемент. Построен график показывающий изменение площади воздействия давления на жестком инструменте в зависимости от давления (рисунок 2).

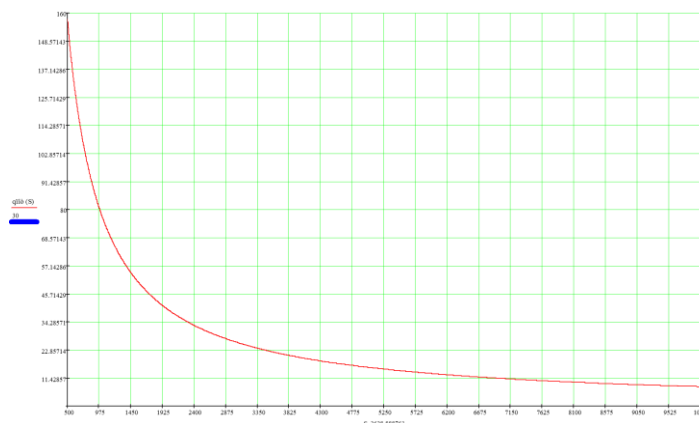


Рисунок 2 – График изменения площади воздействия давления на жестком инструменте в зависимости от давления

Для детали №2 примерный профиль опорной кривой контактной поверхности был выбран в виде сплайновой кривой (рисунок 3).

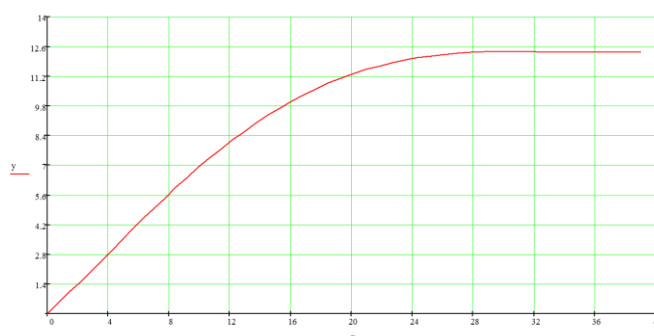


Рисунок 3 – Профиль в системе координат xOy

Для вывода функции данного профиля целесообразно воспользоваться методом наименьших квадратов. Используя данный алгоритм и последовательность решения, интерполируем профиль кривой полиномом 4 порядка (2)

$$y(x) = -0,060389 + 0,723742 \cdot x + 0,005302 \cdot x^2 - 0,000918 \cdot x^3 + 0,000013 \cdot x^4. \quad (2)$$

Теперь можно составить уравнение поверхности чтобы иметь возможность управлять выпуклостью поверхности в направлении оси y. Данный параметр можно использовать для вариации площади контакта подвижного элемента с эластичной средой. В общем виде уравнение поверхности представлено формулой (3)

$$z(x, y) = (\epsilon + \epsilon_1 \cdot x + \epsilon_2 \cdot x^2 + \epsilon_3 \cdot x^3 + \epsilon_4 \cdot x^4) + \left(\omega_1 \cdot \cos \left(\frac{y}{\omega_2} \right) \right), \quad (3)$$

где $\epsilon, \epsilon_1, \epsilon_3, \epsilon_4$ – коэффициенты, контролирующие профиль и позволяющие его модифицировать;

ω_1 – коэффициент, позволяющий менять прогиб поверхности в направлении оси y и направление выпуклости;

ω_2 – коэффициент, отвечающий за размер периода функции в направлении оси z .

Далее была вычислена аналитически площадь поверхности прижима, заданной видом функции $z(x,y)$ с помощью формулы Герона в постановке для четырёхугольника. Стороны A, C и полупериметр имеют вид ((4), (5), (6) и рисунок 4):

$$A = C = \int_0^X \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} \left(\begin{array}{c} a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \\ + a_3 \cdot x^3 + \\ + a_4 \cdot x^4 - a_0 \end{array} \right) \right)^2} dx ; \quad (3)$$

$$p = \frac{A+B+C+D}{2} = 0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^X \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} \left(\begin{array}{c} a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \\ + a_3 \cdot x^3 + \\ + a_4 \cdot x^4 - a_0 \end{array} \right) \right)^2} dx ; \quad (4)$$

$$S_{\text{rep}} = \sqrt{\left((0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D)^2 + \left(-0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^X \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} \left(\begin{array}{c} a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \\ + a_3 \cdot x^3 + \\ + a_4 \cdot x^4 - a_0 \end{array} \right) \right)^2} dx \right)^2 \right) \times \\ \times \left(0,5 \cdot B - 0,5 \cdot D + \int_0^X \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} \left(\begin{array}{c} a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \\ + a_3 \cdot x^3 + \\ + a_4 \cdot x^4 - a_0 \end{array} \right) \right)^2} dx \right)^2} . \quad (5)$$

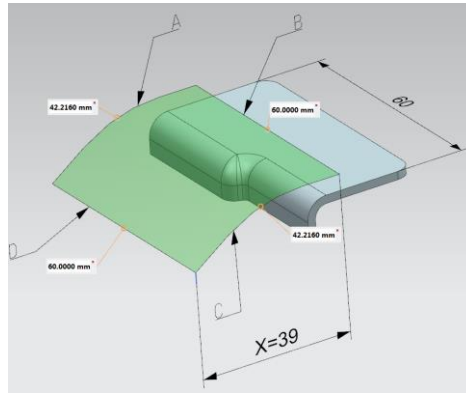


Рисунок 4 – Стороны анализируемой поверхности

Для обеспечения движения подвижного прижима необходимо, чтобы выдерживался угол наклона кривой профиля (рисунок 3) в диапазоне от 30 до 50 градусов. В противном случае возможно заклинивание прижима при движении. Для нахождения угла наклона кривой профиля была продифференцирована функция из формулы (2) и построен график зависимости производной функции от размера профиля по оси x (рисунок 3). С помощью методик анализа функции и поиска экстремума был найден, на графике функции производной, участок, в начале кривой профиля (рисунок 5), в котором функция минимально отличалась от линейной функции (т.е. вариация производной была минимальна). Производная изменяется в этом участке от 35,905 до 36,302, что соответствует нашему искомому углу исходя из геометрического смысла производной. Угол изменяется от $35,905^\circ$ до $36,302^\circ$, что входит в рекомендуемый диапазон от 30° до 50° , чтобы прижим не заклинило при формообразовании.

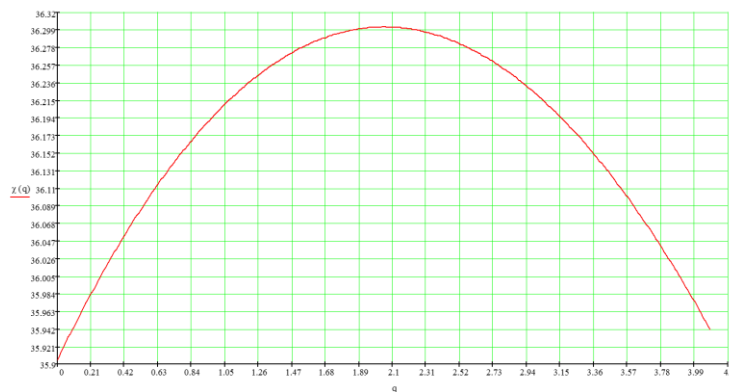


Рисунок 5 – График изменения угла наклона

Для детали №3 были выведены аналогичные формулы с учетом того, что у детали №3 идет процесс посадки гофров при формообразовании (рисунок 6).

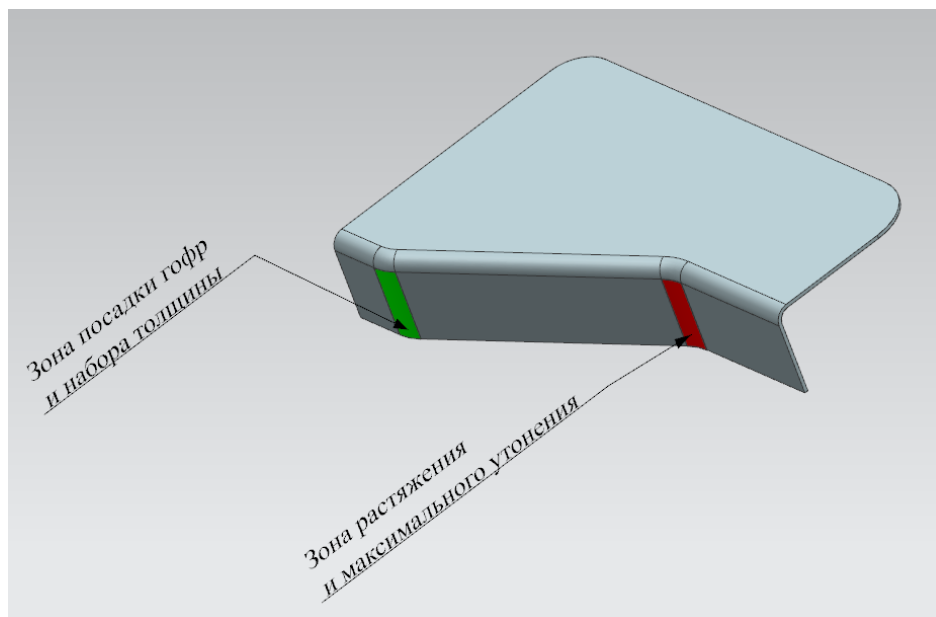


Рисунок 6 – Зоны образования гофр и утонения

В общем виде уравнение поверхности подвижного элемента для данной детали будет иметь вид (6)

$$z_1(x, y) = (\Psi + \Psi_1 \cdot x + \Psi_2 \cdot x^2 + \Psi_3 \cdot x^3 + \Psi_4 \cdot x^4 + \Psi_5 \cdot x^5) + \left(\Omega_1 \cdot \cos \left(\frac{y}{\Omega_2} \right) \right). \quad (6)$$

В связи с тем, что при формовке такого рода подсежки будет идти интенсивное «гофрообразование», первый переход нельзя проводить при максимальном давлении, т.к. это приведёт к избыточному упрочнению в зоне гофры и уменьшению ее размера. Все это приведет к значительному увеличению потребного усилия формообразования, и как следствие, увеличению потребной площади контакта эластичной среды и подвижного элемента оснастки. На первом переходе нужно использовать малое давление, чтобы «гофра» имела большую амплитуду волны при потере устойчивости. Для детали №3 приведена методика расчета графика потребного давления на первом переходе, при выражении всех сторон развертки в месте «гофрообразования» через величину L (рисунок 7).

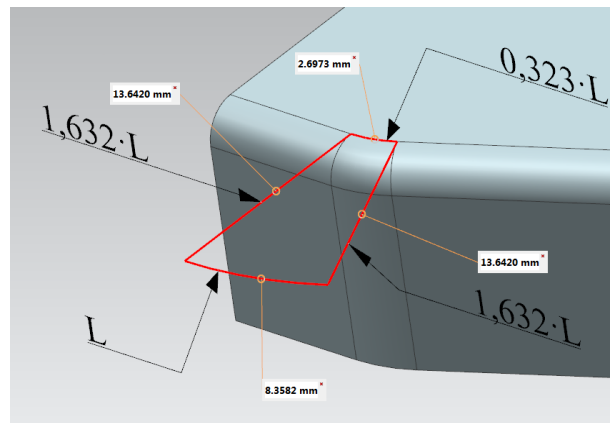


Рисунок 7 – Выражение переменной L всех сторон развертки детали

В результате: разработано уравнение приводящей поверхности подвижного прижима для правой и левой частей номограммы, которые выходят за рекомендуемый диапазон; разработана методика расчета утонения в зоне подсечки; разработана методика расчета потребной площади приводящей поверхности подвижного прижима исходя из параметров подсечки и характеристик оборудования для формообразования; для правой части номограммы разработана методика расчета для определения потребного давления на первом переходе.

В третьей главе описан метод конечных элементов в конкретной реализации программного комплекса PAM-STAMP 2G. Данный программный комплекс выбран для верификации результатов предложенной методики расчета основных параметров, приведённых во второй главе, путем моделирования формообразования. Для детали №2 и детали №3 были спроектированы геометрические модели оснасток с учетом данных, рассчитанных в главе 2.

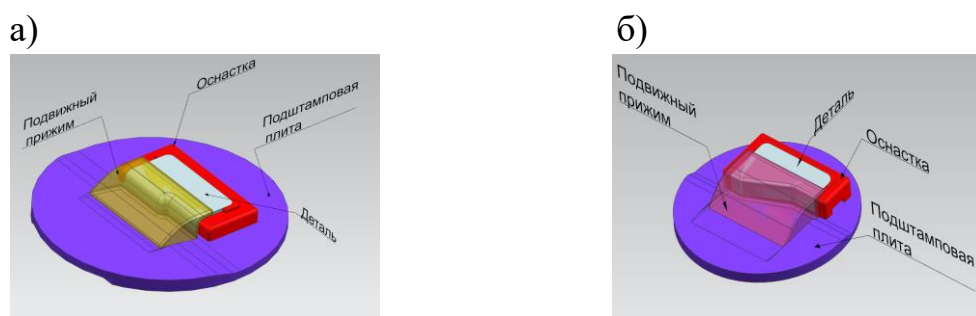


Рисунок 8 – Геометрия комплекта оснастки

- а) – деталь №2;
- б) – деталь №3.

Схема формообразования для моделирования включает этапы:

- перед проведением формообразования на стол прессы устанавливается оснастка, закрепленная на подштамповой плите с пазом для установки подвижного элемента;
- на шпильки оснастки устанавливается заготовка, после чего проводится предварительное формообразование;
- на подштамповую плиту в пазы устанавливается подвижный прижим и выполняется окончательное формообразование, что обеспечивает качественное получение детали с подсечкой.

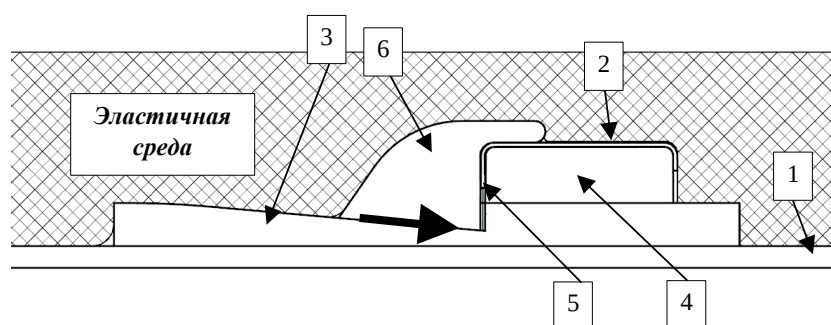


Рисунок 9 – Формообразование с использованием подвижного прижима

- 1) – стол прессы;
- 2) – позиционирующие штыри;
- 3) – подштамповая плита;
- 4) – оснастка для формообразования;
- 5) – заготовка в виде развертки;
- 6) – подвижный прижим.

Эластичная среда воздействует на наклонную поверхность прижима и приводит его в движение по наклонной поверхности паза в подштамповой плите. Перемещение подвижного прижима при окончательной формовке обеспечивает необходимое напряженно-деформированное состояние сжатия и достаточное силовое воздействие на деформируемую зону детали для исключения «недоштамповки» (рисунок 9).

Использование прижима, перемещающегося по наклонной поверхности подштамповой плиты (рисунок 9), создаёт условия всестороннего сжатия в деформируемой зоне детали с «подсечкой» (зоне появления дефекта «недоштамповка»). Условие всестороннего сжатия в проблемной зоне является единственным способом устранения дефектов на нестандартных подсечках при формообразовании.

По результатам моделирования для детали №2 и детали №3 показано, что предлагаемая методика по расчету утонения, деформаций (общие деформации, вычисляемые из формулы длины вектора), напряжений (по энергетической теории прочности) и расчета потребного давления для первого перехода (необходимо только для детали №3) имеет минимальные различия (не более 5%) с моделированием формообразования методом конечных элементов, т.е. предлагаемая методика расчета подтвердила свою адекватность при сравнении с методом конечных элементов.

В четвертой главе рассматриваются натурные эксперименты по предложенным методикам расчета. Была изготовлена оснастка для формообразования детали №2 и детали №3 (рисунок 10).

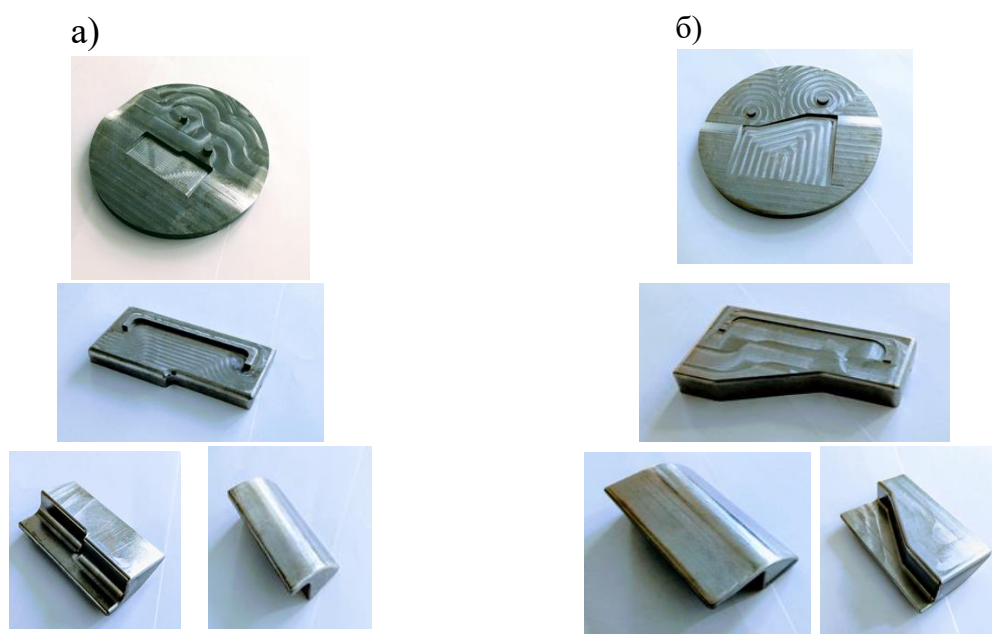


Рисунок 10 – Комплекты для формообразования деталей

а) – деталь №2;

б) – деталь №3.

Рассмотрены установка и проектирование блока эластоформования на прессе ИП 1250 (рисунок 11).



Рисунок 11 – Блок эластоформования на прессе ИП-1250

В результате натурных экспериментов были изготовлены деталь №2 и деталь №3, которые по имеющимся нормативным документам невозможно изготовить без дефектов (рисунок 12). Также были проведены эксперименты на производственной установке QFC 1.2x3-1000 без подвижного прижима, которые показали, что наращивание давления при формообразовании такого рода подсечек не эффективно. Единственный вариант формообразования таких деталей – использовать предлагаемую технологию с подвижным прижимом.

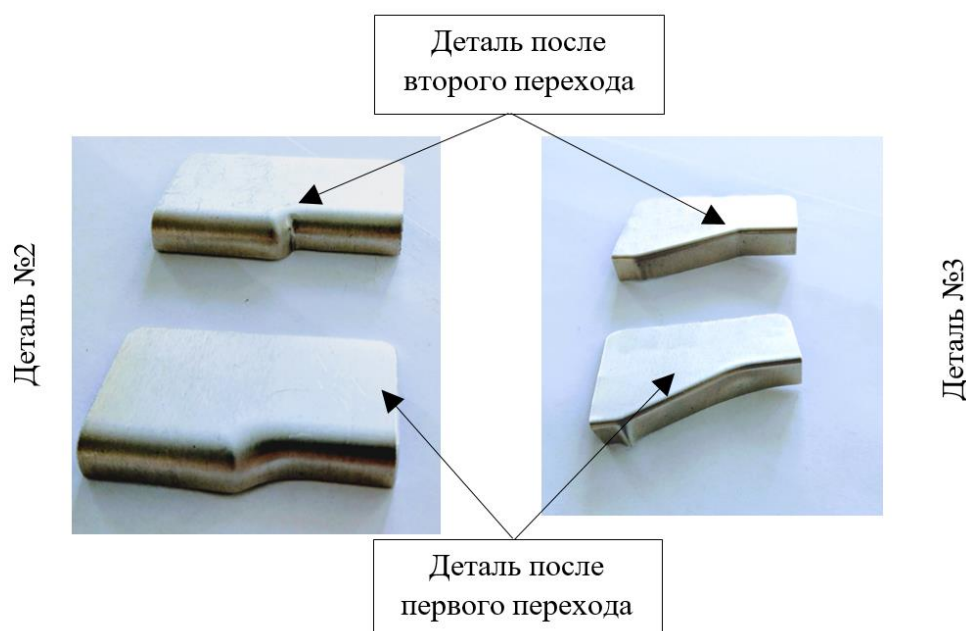


Рисунок 12 – Изготовленные деталь №2 и деталь №3

Используя фотограмметрию и теорию линз, были проанализированы деталь №2 и деталь №3. Разница между результатами, рассчитанными аналитически по предлагаемой методике, и натурным экспериментом составляет не более 1,5 % процента, так что результаты можно считать идентичными. Также натурные эксперименты подтвердили, что использование подвижного прижима снижает требуемое давление формообразования по сравнению с технологиями формообразования без него (при давлении 100 МПа на прессе QFC 1.2x3-1000 – деталь отформована с дефектами, при давлении 30 МПа на разработанной лабораторной установке – деталь получена без дефектов).

Для подтверждения работоспособности и перспективности технологии предлагаемая методика расчета и проектирования оснастки, была опробована на детали из труднодеформируемого сплава ОТ-4 (рисунок 13).

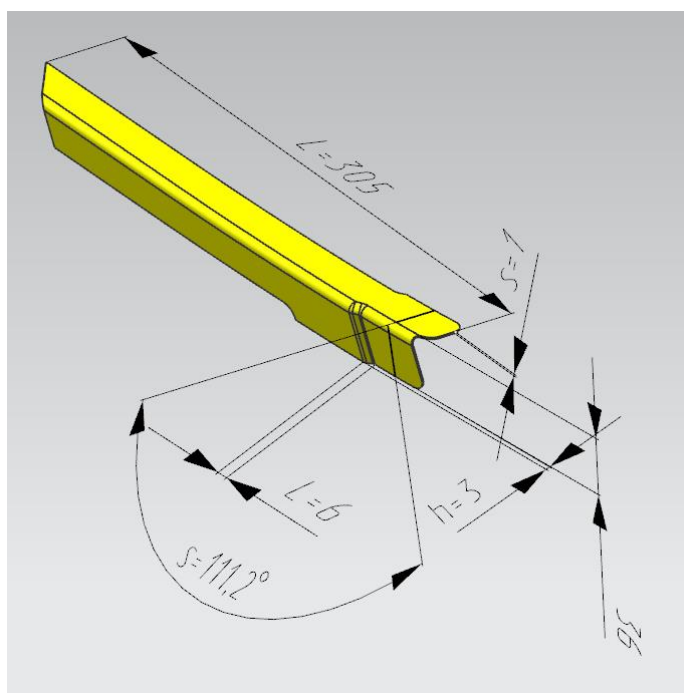


Рисунок 13 – Деталь из титанового сплава

По результатам был спроектирован и изготовлен комплект оснастки для формообразования (рисунок 14).

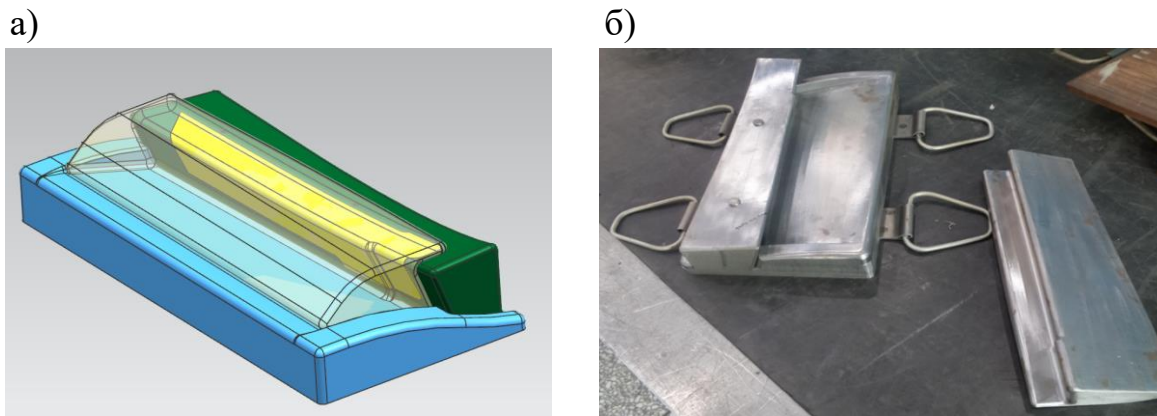


Рисунок 14 – Комплект оснастки для формообразования титановой детали
 а) – геометрическая модель;
 б) – изготовленный комплект оснастки.

В результате, по предложенной в главе 3 технологии, за два перехода с максимальным давлением 20,5 МПа была отформована деталь из титанового сплава без использования нагрева (рисунок 15а). Для подтверждения работоспособности методики и доказательства невозможности изготовления данной детали без подвижного прижима, был произведен натурный эксперимент на производственной установке QFC 1.2x3-1000 при давлении 100 МПа (рисунок 15б).

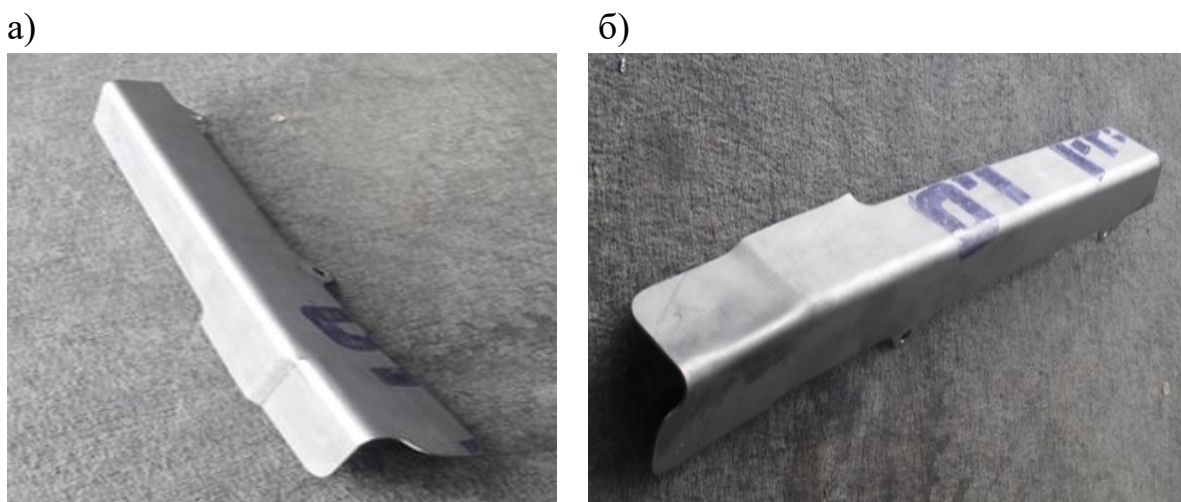


Рисунок 15 – Формообразование титановой детали
 а) – отформованная деталь из титана с применением подвижного прижима;
 б) – отформованная деталь из титана без применения подвижного прижима.

С помощью виртуального моделирования было рассчитано, что «недоштамповка» в районе подсечки без применения подвижного прижима составляет 2 мм, а с применением подвижного прижима - 0,054 мм.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложено решение проблемы, связанное с формообразованием подсечек на листовых деталях, основанное на использовании дополнительного элемента оснастки, который позволяет локализовать деформации в местах появления дефектов и повысить формообразующее усилие. В качестве такого дополнительного элемента оснастки был предложен подвижный элемент, названный подвижным прижимом. Предложена уникальная форма данного элемента оснастки, которая позволяет ему перемещаться при формообразовании и оказывать воздействие на место образования дефектов на детали. Со стороны эластичной среды подвижный прижим имеет интегральную форму, обеспечивающую необходимую передачу усилия под углом на деталь.

2. В процессе решения проблемы, связанной с появлением дефектов на деталях при формообразовании и проектировании подвижного прижима, были решены следующие задачи:

- разработано уравнение приводящей поверхности подвижного прижима для правой и левой частей номограммы;
- разработана методика для расчета утонения и деформации утонения в зоне подсечек исходя из допущений формулы Брахмагупты;
- разработана методика для расчета полной деформации формообразования для правой и левой частей номограммы;
- разработана методика для расчета потребной площади приводящей поверхности подвижного прижима исходя из параметров подсечки и характеристик оборудования для формообразования;
- для правой части номограммы разработана методика расчета для определения потребного давления на первом переходе;
- разработана методика определения угла наклона в начале профиля опорной кривой с использованием анализа экстремумов и дифференцирования функции профиля опорной кривой.

3. Предложена методика проектирования подвижного прижима. Проектирование подвижного прижима начинается с анализа подсечки, определения деформации ее формообразования и утонения на основании формулы Брахмагупты. Далее составляется уравнение поверхности и

определяются необходимые коэффициенты по методу наименьших квадратов. На основании этих данных определяется потребная площадь контакта подвижного прижима с эластичной средой на основании формулы Герона и криволинейного интеграла первого рода. Исходя из этой информации можно выбрать такую площадь контакта, которая соответствует имеющемуся оборудованию (естественно, чем больше давление, развиваемое прессом, тем меньше потребная площадь контакта). В конце с использованием анализа экстремумов и дифференцирования функции профиля опорной кривой определяется угол наклона профиля в начале опорной кривой. Вся эта информация нужна для проектирования и конструирования геометрической модели «подвижного прижима». После проектируется и конструируется комплект оснастки для формообразования, состоящий из подвижного прижима (основной формирующий элемент на втором переходе), подштамповой плиты (элемент, обеспечивающий наклон в движении подвижного прижима и сохранение его направления за счет пазов), оснастки (элемент, являющийся носителем формы детали). Основной идеей является получение устранимого дефекта на первом переходе и устранение его на втором при использовании подвижного прижима.

4. Благодаря решению задач, указанных в пункте 2 удалось получить следующие практические результаты:

- создана технология формообразования с подвижным прижимом;
- устранен дефект «недоштамповка» и «гофрообразование» при формообразовании подсечек на листовых деталях;
- расширены возможности формообразования подсечек на листовых деталях (как минимум на 65 % относительно нормативной документации ОСТ 1.52468–80);
- стало возможно формообразование сложных деталей двойной кривизны с подсечками из труднодеформируемых сплавов без температурного воздействия;
- существенно сократилось трудоемкость изготовления деталей с подсечками (как минимум на 50 % относительно схемы формообразования без подвижного прижима);
- снижено потребное давление как минимум на 40 % при формообразовании деталей с подсечками и как следствие уменьшена стоимость оборудования.

5. Результаты работы использованы:

- в рамках договора по постановлению 218 Правительства РФ «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и

подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» № ИрГТУ 218-3.13.1.017 2013–2015 гг.;

– НИОКР с ИАЗ – филиала ПАО «Корпорация «ИРКУТ» «Разработка методики проектирования рабочей поверхности средств технологического оснащения (СТО) для процесса гидроэластичной формовки на прессе «Avure». Разработка технологической документации на изготовление деталей методом гидроэластичной формовки», 25.01.2017–25.01.2018;

6. На технологию формообразования с подвижным прижимом получен патент на изобретение номер RU 2684130 C1 «Способ формообразования эластичной средой листовых деталей с элементами типа подсечка» (дата государственной регистрации в государственном реестре изобретений 4 апреля 2019 г.).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. **Белых, С. В.** Анализ конструкции и технологии изготовления деталей летательного аппарата из листового материала с использованием программного обеспечения / С. В. Белых, С. И. Феоктистов, А. В. Станкевич, М. М. Погарцева, **В. В. Мироненко** // Авиационная промышленность. – 2015. – № 1. – С. 55 – 59.

2. **Чеславская, А. А.** Устранение складок при формовке деталей с высоким выпуклым бортом путем применения складкодержателя / А. А. Чеславская, **В. В. Мироненко**, С. А. Берсенов, В. В. Котов // Металлург. – 2015. – № 6. – С. 22 – 25.

3. **Чеславская, А. А.** Выбор рационального метода формообразования детали средствами инженерного анализа с применением САЕ-систем / А. А. Чеславская, **В. В. Мироненко**, А. В. Колесников, Н. В. Максименко, В. В. Котов // Металлург. – 2014. – № 12. – С. 24 – 31.

4. **Мироненко, В. В.** Расчет разверток деталей летательных аппаратов с учетом изменения толщины листа в результате формовки / **В. В. Мироненко**, А. А. Чеславская, С. В. Белых // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2014. – Т. 1. – № 1 (17). – С. 13 – 17.

5. Колесников, А. В. Оптимизация технологических процессов изготовления деталей из листа средствами виртуального технологического моделирования / А. В. Колесников, **В. В. Мироненко**, А. А. Чеславская, А. К. Шмаков // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 12 (83). – С. 73 – 77.

6. **Мироненко, В. В.** К вопросу оптимизации и проектирования деталей, изготавливаемых вытяжкой эластичной средой, с применением реконструкции / **В. В. Мироненко**, Е. А. Мацуро // Труды МАИ. – 2018. – № 99. – С. 14.

Публикации в изданиях, входящих в перечень справочной информации об отечественных изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования и в соответствии с пунктом 5 правил формирования перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

7. **Cheslavskya, A. A.** Eliminating wrinkling during the forming of parts with a tall convex side by using wrinkle suppressors / A. A. Cheslavskya, **V. V. Mironenko**, S. A. Bersenev, V. V. Kotov // Metallurgist. – 2015. – Volume. 59. № 5 – 6. – P. 455 – 460.

8. **Mironenko, V. V.** Accounting for the technological history of the formation of a part in strength calculations / **V. V. Mironenko**, O. E. Polyakova, D. A. Sechkarenko // Metallurgist. – 2016. – Volume. 59. № 9 – 10. – P. 871 – 876.

9. **Mironenko, V. V.** Accounting for the technological history of the formation of a part in strength calculations. part 2 / **V. V. Mironenko**, O. E. Polyakova, D. A. Sechkarenko // Metallurgist. – 2016. – Volume. 59. № 11 – 12. – P. 1015 – 1019.

10. **Mironenko, V. V.** Analysis of combined hydroforming and blanking of sheet articles / **V. V. Mironenko**, E. V. Ledovskikh, S. A. Osipov, A. A. Ershov // Metallurgist. – 2017. – Volume. 60. № 11 – 12. – P. 1123 – 1129.

11. **Mironenko, V. V.** Formation of self-sealing tubular blanks with a moving edge / **V. V. Mironenko**, S. A. Osipov, A. A. Ershov // Metallurgist. – 2017. – Volume. 60. № 11 – 12. – P. 1209 – 1215.

12. **Cheslavskaya, A. A.** Choosing an efficient method for forming parts by means of an engineering analysis performed with the use of a CAE system / **A. A. Cheslavskaya, V. V. Mironenko, A. V. Kolesnikov, N. V. Maksimenko, V. V. Kotov** // *Metallurgist* 2015. – Volume. 58. – № 11 – 12. – P. 1051 – 1059.

13. **Мироненко, В. В.** Анализ совмещенного процесса формообразования и вырубки листовых деталей эластичной средой / **В. В. Мироненко, Е. В. Ледовских, С. А. Осипов, А. А. Ершов** // *Металлург.* – 2016. – №11. – С. 23 – 27.

Публикации в других научных изданиях

14. **Mironenko, V. V.** Reverse engineering as a way to optimize and design parts produced by elastic-medium drawing / **V. V. Mironenko, E. A. Matsuro, E. V. Ledovskikh** // *MATEC Web of Conferences.* – 2018. – №224. P. 01021.

15. **Mironenko, V. V.** Movable-clamp undercutting of sheet metal parts / **V. V. Mironenko, A. K. Shmakov** // *Advances in Engineering Research, International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018).* – 2018. – volume №158. – P. 271 – 275.

16. **Мироненко, В. В.** Учет технологической истории формообразования детали в расчетах на прочность / **В. В. Мироненко, О. Е. Полякова, Д. А. Сечкаренко, В. В. Котов** // *Металлург.* – 2015. – №10. – С. 10 – 13.

17. **Мироненко, В. В.** Учет технологической истории формообразования детали в расчетах на прочность. Часть 2 / **В. В. Мироненко, О. Е. Полякова, Д. А. Сечкаренко, В. В. Котов** // *Металлург.* – 2015. – №11. – С. 28 – 30.

18. **Мироненко, В. В.** Формообразование трубчатых заготовок со скользящей кромкой и самогерметизацией / **В. В. Мироненко, С. А. Осипов, А. А. Ершов** // *Металлург.* – 2016. – №12. – С. 16 – 20.

19. **Мироненко, В. В.** Формообразование подсечек на листовых деталях с применение подвижного прижима / **В. В. Мироненко** // *Труды МАИ.* – 2019. – №104. – С. 19.

Мироненко Владимир Витальевич

Исследование процессов формообразования эластичной средой элемента
типа «подсечка» на листовых заготовках подвижными элементами
оснастки

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 15.01.2021 Заказ № _____

Формат 60×90×16. Усл.печ.л. 1.40 Тираж 120 экз.

Типография _____