

Резнюк Кирилл Дмитриевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ПЛАСТИН
ТЕПЛООБМЕННИКОВ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ
ЭЛАСТИЧНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ ПОЛИУРЕТАНА**

Специальность 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2026

Работа выполнена на кафедре «Технологии обработки материалов» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Лавриненко Владислав Юрьевич
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Попов Игорь Петрович
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры обработки металлов
давлением ФГАОУ ВО «Самарский
национальный исследовательский
университет имени академика С.П.
Королева»

Арсентьева Ксения Сергеевна
кандидат технических наук,
доцент Высшей школы машиностроения
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Московский политехнический
университет»

Защита состоится « » _____ 2026 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета 24.2.331.01 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок 8 (499) 263-66-33 доб. 40-57.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим
направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного
технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.01
кандидат технических наук, доцент



Плохих А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Пластинчатые теплообменники получили широкое применение в энергетической, химической, нефтегазодобывающей, пищевой, машиностроительной и других отраслях промышленности, т.к. имеют более высокую эффективность по теплопередаче и гидравлическому сопротивлению, чем кожухотрубные теплообменники.

В настоящее время в России существует высокая потребность в пластинчатых теплообменниках, составляющая более 100 тыс. шт. в год (соответственно, потребность в пластинах - более 10 млн. шт. в год).

Основными элементами пластинчатых теплообменников являются пластины из коррозионностойких сталей 08X18H10, 12X18H10T, 03X17H14M3, 10X17H13M2T, цветных сплавов АМц, М1М, ВТ 1-0 и др. с каналами различной формы на поверхности: локальными углублениями (ширина каналов сопоставима с их длиной) и продольными каналами (длина канала кратно превосходит его ширину). Продольные каналы имеют характерные W- и V-образные профили и трапецевидное поперечное сечение. Основными геометрическими характеристиками пластины являются толщина и габаритные размеры пластины, относительная глубина канала Н/В, относительный радиус, ширина и шаг каналов.

В настоящее время основной технологией изготовления пластин теплообменников является рельефная штамповка (формовка) в жестком штампе, не позволяющая получать относительную глубину каналов Н/В более 0,18 за один переход при толщине изготавливаемых пластин от 0,8 до 1,2 мм. При этом для изготовления пластин теплообменников с большей относительной глубиной каналов Н/В необходимо проводить промежуточные отжиги, что существенно повышает трудоемкость изготовления изделий.

Кроме этого, в условиях единичного или мелкосерийного производства при переходе на изготовление нового типоразмера пластин требуется изготовление нового дорогостоящего металлоемкого рабочего инструмента (пуансон и матрица), что существенно увеличивает себестоимость продукции.

Одним из путей снижения производственных затрат, сокращения трудоемкости изготовления и повышения качества пластин теплообменников из коррозионностойких сталей является формовка эластичным рабочим инструментом (пуансоном) из полиуретана в открытом и закрытом объемах, применение которого обеспечивает получение пластины с увеличенной относительной глубиной каналов Н/В (до 0,3 и более) и высоким качеством поверхности.

Вместе с тем, широкое использование эластичного рабочего инструмента из полиуретана для листовой штамповки пластин теплообменников из коррозионностойких сталей ограничено отсутствием сведений о характеристиках промышленных полиуретанов, отсутствием математического описания формовки листовой заготовки эластичным инструментом из полиуретана для определения особенностей формоизменения, напряженно-деформированного состояния и силовых параметров процесса, а также отсутствием научно-обоснованной методики проектирования процессов листовой штамповки пластин

теплообменников с использованием эластичного инструмента из полиуретана в открытом и закрытом объемах.

Таким образом, разработка технологии листовой штамповки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали эластичным инструментом из полиуретана, обеспечивающей получение пластины с относительной глубиной каналов Н/В до 0,3, снижение производственных затрат, сокращение трудоемкости изготовления изделий в условиях единичного или мелкосерийного производства, является актуальной задачей для современного машиностроения.

Целью работы является расширение технологических возможностей листовой штамповки пластин теплообменников с увеличенной относительной глубиной каналов (до 0,3) из коррозионностойкой стали с использованием эластичного инструмента из полиуретана, обеспечивающего снижение производственных затрат, сокращение трудоемкости изготовления изделий в условиях единичного или мелкосерийного производства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Анализ существующих конструкций и технологий изготовления пластин теплообменников, анализ существующих исследований особенностей формоизменения, напряженно-деформированного состояния при формовке листовых заготовок.

2. Разработка методики и проведение экспериментально-теоретических исследований характеристик неармированного полиуретана марок ПФЛ-100, СКУ-7Л и армированного полиуретана ПФЛ-100-А и СКУ-7Л-А.

3. Проведение теоретических исследований и разработка математических моделей процессов формовки пластин теплообменников с использованием эластичного инструмента из полиуретана в открытом и закрытом объемах для определения особенностей формоизменения, напряженно-деформированного состояния и силовых параметров с использованием программного комплекса ANSYS.

4. Разработка методики и проведение экспериментальных исследований процессов формовки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали эластичным инструментами из неармированного и армированного полиуретана в открытом и закрытом объемах.

5. Разработка методики проектирования процессов листовой штамповки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали с использованием эластичного инструмента из полиуретана в открытом и закрытом объемах.

6. Разработка технологического процесса листовой штамповки пластины теплообменника S32H из коррозионностойкой стали марки 08X17H13M2 (AISI 316) эластичным инструментом из полиуретана.

Объект исследования: листовая штамповка (формовка) пластин теплообменников эластичным инструментом из полиуретана.

Предмет исследования: характеристики полиуретана, напряженно-деформированное состояние, силовые параметры листовой штамповки (формовки) пластин теплообменников эластичным инструментом из полиуретана.

Научная новизна работы заключается:

- в полученных зависимостях для расчета потребного давления q формовки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали в открытом и закрытом объемах с использованием неармированного и армированного полиуретана от относительной глубины каналов H/B и толщины t пластины теплообменника;
- в полученной области рационального применения формовки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали 08X17H13M2 (AISI 316) с использованием эластичного инструмента из полиуретана в зависимости от геометрических параметров деталей (относительной глубины каналов H/B и толщины t).

Практическая значимость работы заключается:

- в разработанной методике проектирования процессов листовой штамповки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали с использованием эластичного инструмента из полиуретана в открытом и закрытом объемах, применение которой позволяет получать пластины с относительной глубиной каналов H/B до 0,3, снизить производственные затраты, сократить трудоемкость изготовления изделий в условиях единичного или мелкосерийного производства;
- в разработанном технологическом процессе листовой штамповки пластины теплообменника S32H из коррозионностойкой стали марки 08X17H13M2 (AISI 316) с использованием эластичного инструмента из армированного полиуретана ПФЛ-100-А в закрытом объеме.

Методы исследований. Теоретические исследования особенностей формоизменения, напряженно-деформированного состояния, силовых параметров при формовке эластичным инструментом выполнены с использованием существующих положений теории обработки давлением и теории пластичности, компьютерного моделирования процессов листовой штамповки в программном комплексе Ansys.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием современной универсальной испытательной машины Instron 600DX-F1-G1, гидравлического пресса с номинальной силой 1,6 МН, спроектированной штамповой оснастки и эластичного инструмента из полиуретана, высокопроизводительных компьютеров. Обработку полученных результатов проводили с использованием методов математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса листовой штамповки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали с помощью эластичного инструмента из полиуретана, показывающие особенности формоизменения, напряженно-деформированного состояния и силовые параметры;
- методика проектирования процессов листовой штамповки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали с использованием эластичного инструмента из полиуретана в открытом и закрытом объемах, применение которой обеспечивает снижение производственных затрат, сокращение трудоемкости изготовления изделий в условиях единичного или мелкосерийного производства;

-разработанный технологический процесс листовой штамповки пластины теплообменника S32H из коррозионностойкой стали марки 08X17H13M2 (AISI 316) эластичным инструментом из армированного полиуретана ПФЛ-100-А в закрытом объеме.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается применением современного испытательного оборудования и методов анализа, сходимостью теоретических и экспериментальных результатов исследований с расхождением менее 10%.

Реализация работы. Разработанный технологический процесс листовой штамповки пластины теплообменника S32H из коррозионностойкой стали марки 08X17H13M2 (AISI 316) с использованием эластичного инструмента из армированного полиуретана ПФЛ-100-А в закрытом объеме планируется к применению в производственных условиях ООО «ЗАВОД ТЕРМОСИСТЕМЫ» (г. Краснодар).

Разработанная методика проектирования процессов листовой штамповки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали с использованием эластичного инструмента из полиуретана может быть использована на отечественных предприятиях – производителях пластинчатых теплообменников (АО «Ридан», ООО «ЗАВОД ТЕРМОСИСТЕМЫ», ООО "Термоблок", ООО «Теплотекс АПВ», Группа Компаний «Анвитэк, ООО НПО «ЭТРА» и др.) для снижения производственных затрат, сокращения трудоемкости изготовления изделий в условиях единичного или мелкосерийного производства.

Личный вклад автора состоит в проведении теоретических и экспериментальных исследований процесса листовой штамповки (формовки) пластин теплообменников из коррозионностойкой стали эластичным инструментом из полиуретана, в разработке математических моделей процесса листовой штамповки эластичным инструментом в открытом и закрытом объемах, в определении области рационального применения формовки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали с использованием эластичного инструмента из полиуретана, в разработке методики проектирования процессов листовой штамповки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали с использованием эластичного инструмента из полиуретана, в разработке технологического процесса листовой штамповки пластины S32H теплообменника из коррозионностойкой стали марки 08X17H13M2 (AISI 316) эластичным инструментом из полиуретана.

Апробация работы. Основные положения и материалы работы доложены на международной научно-практической конференции «State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2023». Ростов-на-Дону, 2023; на международной научно-практической конференции «Фундаментальные основы механики». Москва, 2023; на международной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии в машиностроении». Москва, 2023; на Международной научно-технической конференции «МашТех – 2025». Москва, 2025; научных семинарах кафедры технологий обработки материалов МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2023-2025; на научно-технических совещаниях ООО «ЗАВОД ТЕРМОСИСТЕМЫ». Краснодар, 2026.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, 1 статья в издании, входящем в базу SCOPUS, 2 статьи - в сборниках трудов научно-технических конференций. Общий объем – 2,7 п.л., авторский вклад – 2,1 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав основного текста, основных выводов по работе и приложений. Общий объем диссертации составляет 145 страниц. Диссертация содержит 112 рисунков, 19 таблиц и список литературы из 92 наименований.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность д.т.н., профессору И.Е. Семенову за постановку задачи и начало работы над диссертацией.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой в работе научно-технической проблемы, сформулированы цель и задачи работы, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, достоверность, научная значимость, практическая ценность и реализация работы, приведены данные о публикациях, структуре и объеме диссертационной работы.

В Главе 1 проведен анализ существующих конструкций и технологий изготовления пластин теплообменников. Отмечено, что в настоящее время пластины теплообменников с локальными углублениями и продольными каналами изготавливают из коррозионностойких сталей 08X18H10, 12X18H10T, 03X17H14M3, 10X17H13M2T, цветных сплавов АМц, М1М, ВТ 1-0 и др. преимущественно рельефной штамповкой (формовкой) в жестких металлических штампах, не позволяющей получать относительную глубину каналов Н/В более 0,18 за один переход при толщине изготавливаемых пластин от 0,8 до 1,2 мм. При этом для изготовления пластин теплообменников с большей относительной глубиной каналов Н/В необходимо проводить промежуточные отжиги, что существенно повышает трудоемкость изготовления изделий.

Одним из путей снижения производственных затрат, сокращения трудоемкости изготовления и повышения качества пластин теплообменников из коррозионностойких сталей является формовка эластичным рабочим инструментом (пуансоном) из полиуретана в открытом и закрытом объемах, применение которого обеспечивает получение пластины с увеличенной относительной глубиной каналов Н/В (до 0,3 и более) и высоким качеством поверхности.

Кроме этого, в условиях единичного или мелкосерийного производства при переходе на изготовление нового типоразмера пластин требуется изготовление нового дорогостоящего металлоемкого рабочего инструмента (пуансон и матрица), что существенно увеличивает себестоимость продукции.

Исследования особенностей формоизменения, напряженно-деформированного состояния, а также силовых параметров при формовке листовых заготовок, в том числе с использованием эластичного инструмента (резины и полиуретана) проводили: Попов Е.А., Романовский В.П., Исаченков Е.И., Семенов И.Е., Моисеев В.К., Орленко Г.П., Глушников В.А. и другие ученые.

Вместе с тем, широкое использование эластичного рабочего инструмента из полиуретана для листовой штамповки пластин теплообменников из коррозионностойких сталей ограничено отсутствием сведений о характеристиках промышленных полиуретанов, отсутствием математического описания формовки листовой заготовки эластичным инструментом из полиуретана, а также отсутствием научно-обоснованной методики проектирования процессов листовой штамповки пластин теплообменников с использованием эластичного инструмента из полиуретана в открытом и закрытом объемах.

В результате проведенного анализа существующих методов исследования процессов листовой штамповки отмечено, что для определения характеристик эластичных материалов (полиуретанов), исследования особенностей формоизменения, напряженно-деформированного состояния и силовых параметров при формовке листовых заготовок эластичным инструментом целесообразно использовать компьютерное моделирование в программном комплексе ANSYS, обеспечивающем достаточную точность расчета и требующий минимальных затрат. Программный комплекс ANSYS основан на методе конечных элементов и позволяет изучить формоизменение заготовки на различных этапах деформирования, а также описать явления, происходящие в очаге пластической деформации.

Обоснована постановка задач исследования.

В Главе 2 проведены экспериментальные исследования для определения характеристик (констант Муни-Ривлина) эластичного инструмента: неармированного полиуретана марок СКУ-7Л-S и ПФЛ-100-S, а также армированного полиуретана марок СКУ-7Л-A и ПФЛ-100-A. В качестве армирующего слоя использовали арамидную ткань марки «Kevlar DuPont K29 1000D» (поверхностная плотность 210 г/м²), расположенную в середине образцов с размерами 96 x 96 x 20 мм.

Экспериментальные исследования процесса сжатия образцов из полиуретана проводили на испытательной машине INSTRON модели 600DX-F1-G1 (максимальная сила 600 кН).

Графики зависимости силы осадки образцов из полиуретана марок СКУ-7Л-S и СКУ-7Л-A от величины деформации (хода пуансона) для неармированного полиуретана ПФЛ-100-S приведены на Рисунке 1, для армированного полиуретана ПФЛ-100-A – на Рисунке 2.

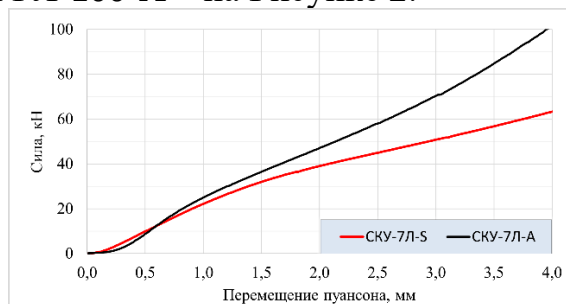


Рисунок 1. График зависимости силы осадки для СКУ-7Л-S и СКУ-7Л-A

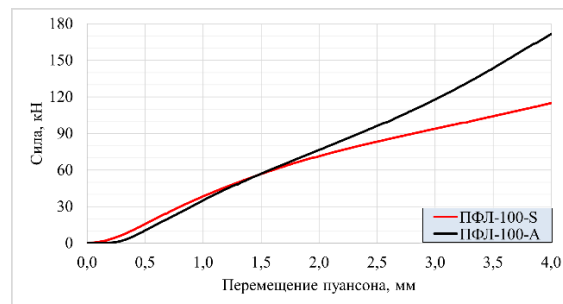


Рисунок 2. График зависимости силы осадки для ПФЛ-100-S и ПФЛ-100-A

Можно отметить, что армирование полиуретана позволило увеличить силу осадки образцов в 1,5...1,6 раз по сравнению с неармированным полиуретаном, что можно в дальнейшем использовать в технологических целях при формовке пластин теплообменников.

Кроме этого, были определены значения констант Муни-Ривлина C_{10} и C_{01} для различных марок полиуретана (Таблица 1).

Таблица 1.

Константы Муни-Ривлина для различных марок полиуретана

Марка полиуретана	C_{10} , МПа	C_{01} , МПа
СКУ-100-S	2,49	0,23
СКУ-100-A	4,54	0,58
ПФЛ-100-S	5,12	0,68
ПФЛ-100-A	6,71	0,73

Полученные константы C_{10} и C_{01} в дальнейшем были использованы для разработки математических моделей поведения эластичного инструмента из полиуретана при сжатии в процессе формовки пластины в среде ANSYS.

В Главе 3 было проведено построение математической модели процесса сжатия эластичного инструмента из неармированного полиуретана ПФЛ-100-S и армированного полиуретана ПФЛ-100-A в среде ANSYS. Было установлено, что при использовании армированного полиуретана происходит увеличение нормальных контактных напряжений на 25% по сравнению с неармированным.

Кроме этого, установленное расхождение экспериментальных и расчетных значений силы сжатия полиуретана, не превышающее 6%, позволило использовать построенные математические модели эластичного инструмента из полиуретана ПФЛ-100-S и ПФЛ-100-A для дальнейшего компьютерного моделирования процессов формовки пластин теплообменников.

Далее была проведена разработка математической модели процесса формовки пластины теплообменника из коррозионностойкой стали 08X18H10 с использованием эластичного инструмента из неармированного полиуретана ПФЛ-100-S и армированного полиуретана ПФЛ-100-A в открытом и закрытом объемах в среде ANSYS.

На Рисунке 3 приведен эскиз и трехмерный вид матрицы для формовки пластины (при моделировании принята жестким инструментом). Максимальная относительная глубина Н/В для продольных каналов и локальных углублений составляет 0,3.

В результате моделирования процесса формовки пластины теплообменника в открытом объеме при использовании неармированного полиуретана ПФЛ-100-S и армированного полиуретана ПФЛ-100-A было установлено, что максимальная относительная глубина Н/В для продольных каналов и локальных углублений не превышала 0,02...0,06. Таким образом, установлено, что формовка в открытом объеме с использованием эластичного инструмента теоретически не позволяет получить пластины с требуемой относительной глубиной каналов 0,3.

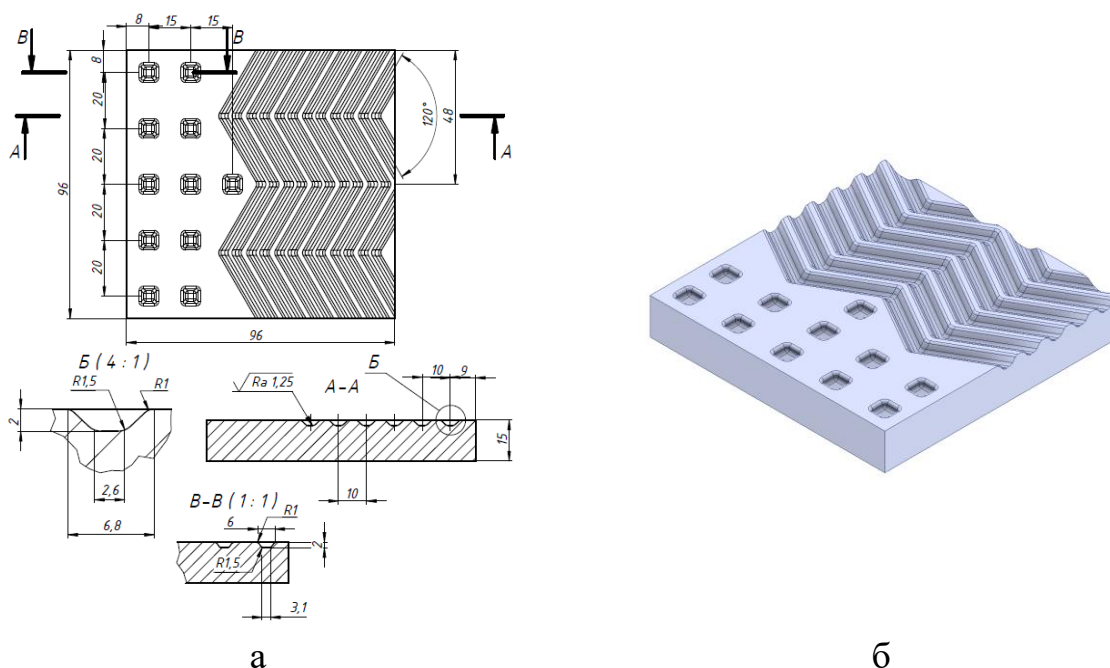


Рисунок 3. Эскиз (а) и трехмерный вид (б) матрицы для формовки пластины

Также в результате моделирования процесса формовки пластины теплообменника в закрытом объеме было установлено, что максимальная относительная глубина Н/В для продольных каналов и локальных углублений составила: для неармированного полиуретана ПФЛ-100-S – 0,26 и 0,17 соответственно; для армированного полиуретана ПФЛ-100-A 0,3 и 0,25 соответственно. На Рисунке 4 приведены значения глубины продольных каналов и локальных углублений при формовке армированным полиуретаном ПФЛ-100-A.

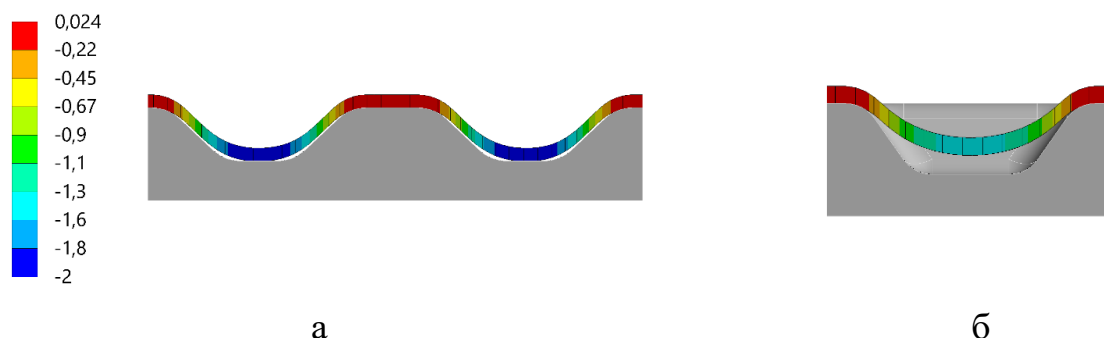


Рисунок 4. Глубина продольных каналов (а) и локальных углублений (б) при штамповке в закрытом объеме с помощью армированного полиуретана ПФЛ-100-A

Таким образом, формовка в закрытом объеме с использованием эластичного инструмента в виде армированного полиуретана позволяет получить пластины из коррозионностойкой стали с требуемой относительной глубиной каналов до 0,3.

Также было установлено, что наибольшее утонение пластины теплообменника при формовке в вершинах продольных каналов достигает 8,7%, а в вершинах локальных углублений достигает 15,5% (Рисунок 5).

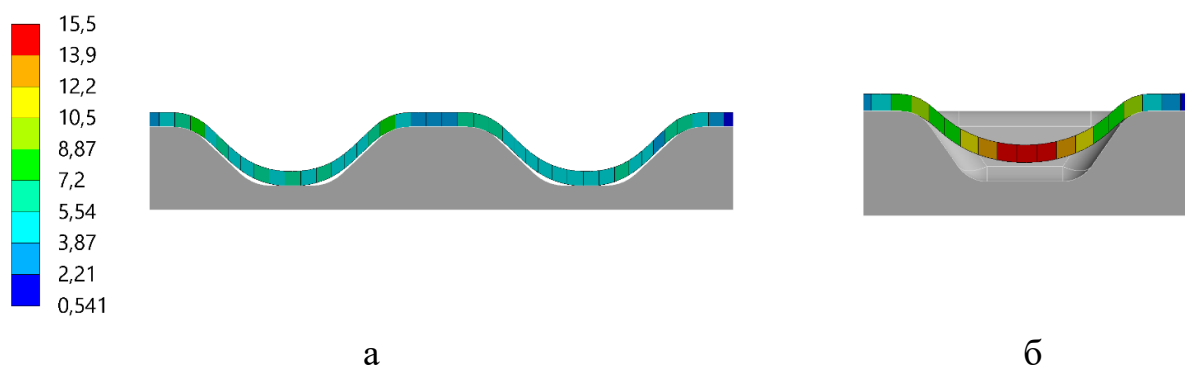


Рисунок 5. Утонение пластины теплообменника в продольных каналах (а) и локальных углублениях (б) при формовке в закрытом объеме с помощью армированного полиуретана ПФЛ-100-А

Таким образом, расчетное утонение пластины теплообменника при формовке в закрытом объеме с помощью армированного полиуретана не превышает допустимых значений 20...25%.

Кроме этого, были получены формулы для расчета потребного давления q формовки пластин теплообменников в открытом и закрытом объемах с использованием неармированного и армированного полиуретана в зависимости от относительной глубины каналов H/B и толщины t пластины теплообменника.

$$q = K_1 \left(\frac{H}{B} \right)^2 + K_2 \left(\frac{H}{B} \right). \quad (1)$$

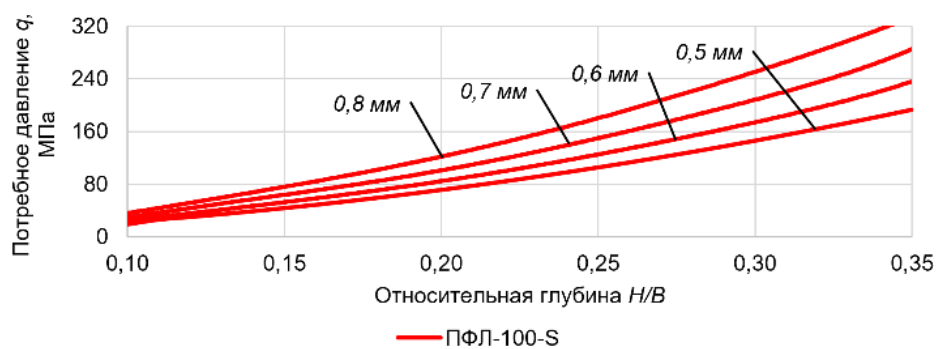
В Таблице 2 приведены значения коэффициентов K_1 и K_2 для расчета потребного давления с использованием формулы (1).

Таблица 2.

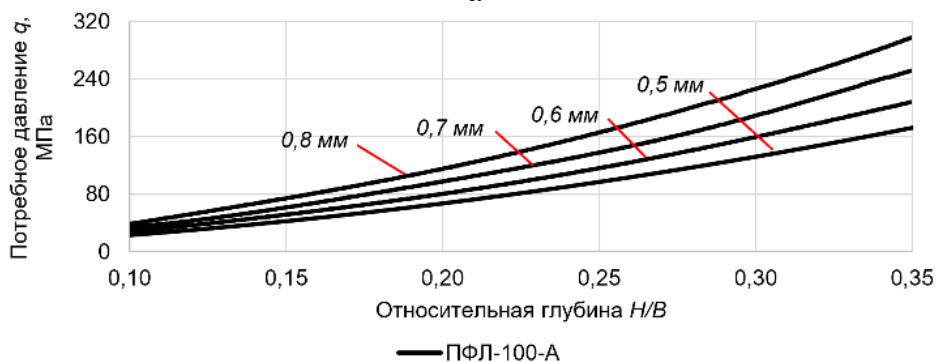
Значения коэффициентов K_1 и K_2

Толщина t , мм	ПФЛ-100-S		ПФЛ-100-A	
	K_1 , МПа	K_2 , МПа	K_1 , МПа	K_2 , МПа
0,5	1092	84	1040	129
0,6	1278	99	1238	154
0,7	1546	119	1447	186
0,8	1902	146	1767	218

Номограммы потребного давления q от H/B для разных толщин t при формовке в закрытом объеме полиуретаном ПФЛ-100-S представлены на Рисунке 6, а, полиуретаном ПФЛ-100-A – на Рисунке 6, б.



а



б

Рисунок 6. Зависимость потребного давления q при формовке в закрытом объеме полиуретаном ПФЛ-100-S (а) и полиуретаном ПФЛ-100-A (б)

В Главе 4 приведена экспериментальная верификация математических моделей процессов формовки эластичной средой в закрытом объеме. В результате формовки неармированным полиуретаном ПФЛ-100-S были получены продольные каналы с глубиной $2,03 \pm 0,01$ мм (относительная глубина $H/B = 0,31$) и локальные углубления с глубиной $2,09 \pm 0,01$ мм (относительная глубина $H/B = 0,35$) (Рисунок 7).



Утонение в локальных углублениях

Утонение в продольных каналах

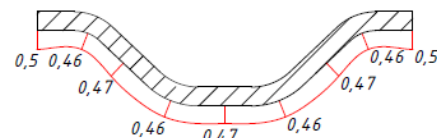
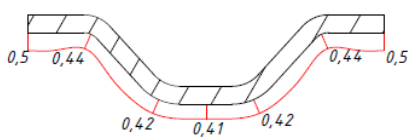


Рисунок 7. Элементы пластины теплообменника, полученные при формовке в закрытом объеме полиуретаном ПФЛ-100-S

В результате формовки полиуретаном ПФЛ-100-A были получены продольные каналы с глубиной $2,03 \pm 0,01$ мм (относительная глубина $H/B = 0,31$) и

локальные углубления с глубиной $2,08 \pm 0,01$ мм (относительная глубина $H/B = 0,35$) (Рисунок 9).

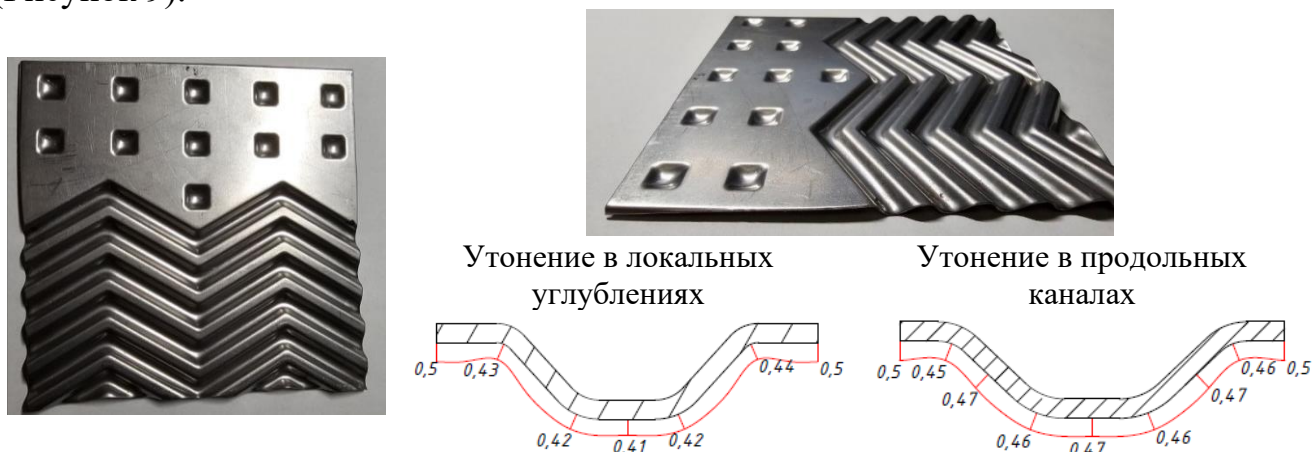


Рисунок 8. Элементы пластин теплообменника, полученные при формовке в закрытом объеме полиуретаном ПФЛ-100-А

Можно отметить, что утонение пластины теплообменника при экспериментальной формовке в закрытом объеме с помощью армированного полиуретана составило не более 18% и не превысило допустимых значений 20...25% (Рисунок 8).

Проведенное сравнение расчетных и экспериментальных значений и распределения утонения пластины теплообменника при формовке в закрытом объеме эластичным инструментом из неармированного полиуретана ПФЛ-100-S и армированного полиуретана ПФЛ-100-А позволило установить высокую сходимость полученных данных с расхождением не более 8...9%.

В Главе 5 получена область рационального применения формовки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали 08X17H13M2 (AISI 316) с использованием эластичного инструмента из полиуретана в зависимости от геометрических параметров деталей (относительной глубины каналов H/B и толщины t) (Рисунок 10).

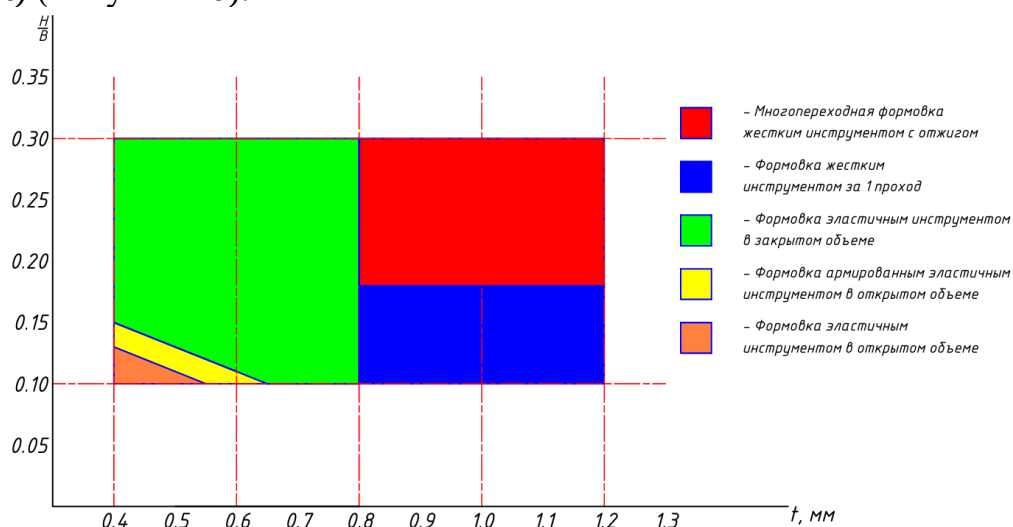


Рисунок 10. Область рационального применения формовки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали

Также была разработана методика проектирования процессов листовой штамповки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали с использованием эластичного инструмента из полиуретана в открытом и закрытом объемах, основными этапами которой являются:

1. Анализ чертежа детали и основных размеров пластины теплообменника: относительную глубину канала H/V , относительный радиус r/t , габариты пластины, толщину заготовки t .

2. Выбор рациональной технологии изготовления пластины теплообменника в зависимости материала, геометрических размеров, серийности производства. Определение возможности применения штамповки эластичной средой (неармированным или армированным полиуретаном) в закрытом или открытом объемах (Рисунок 10).

3. Определение максимальной силы формовки F пластины теплообменника эластичным инструментом с использованием полученной формулы (1) для расчета потребного давления q формовки пластин теплообменников в открытом и закрытом объемах с использованием неармированного и армированного полиуретана в зависимости от относительной глубины каналов H/V и толщины t пластины теплообменника (Рисунок 6).

4. Проектирование технологической оснастки и оформление технологической документации.

5. Опытная проверка технологии изготовления пластины теплообменника.

6. Запуск в производство.

Далее с использованием предложенной методики был разработан новый технологический процесс листовой штамповки пластины теплообменника S32H из коррозионностойкой стали марки 08X17H13M2 (AISI 316) (Рисунок 11). Основные размеры пластины: габариты 429 x 125 мм, толщина пластины $t = 0,5$ мм, относительная глубина продольных каналов $H/V = 0,29$, относительная глубина единичных каналов $H/V = 0,23$. Программа выпуска – 500 шт. / год.

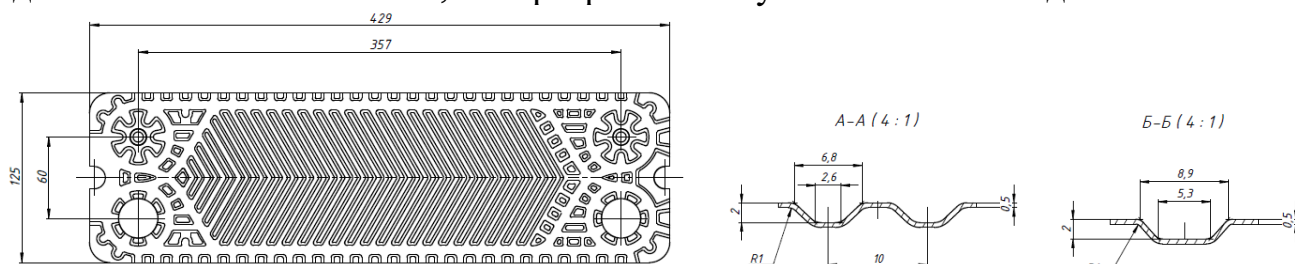


Рисунок 11. Эскиз пластины теплообменника S32H

В настоящее время технологический процесс изготовления данного изделия включает следующие операции: лазерная резка исходной заготовки, первая формовка до относительной глубины канала $H/V = 0,1$, первый отжиг, вторая формовка до относительной глубины канала $H/V = 0,2$, второй отжиг, третья формовка относительной глубины канала $H/V = 0,3$, обрезка кромок, травление и контроль основных геометрических размеров.

С использованием диаграммы (Рисунок 10) был выбран рациональный способ формовки данной пластины теплообменника с использованием эластичного инструмента из полиуретана в закрытом объеме.

С использованием формулы (1) было определено потребное давление q и сила формовки F : для неармированного полиуретана ПФЛ-100-S ($q = 137$ МПа, $F = 13,5$ МН); для армированного полиуретана ПФЛ-100-A ($q = 125$ МПа, $F = 12,3$ МН).

Кроме этого, была спроектирована оснастка (контейнер) для размещения эластичного инструмента (пуансона).

Предлагаемый технологический процесс изготовления пластины теплообменника S32H включает следующие операции: лазерная резка исходной заготовки, формовка полиуретаном до относительной глубины продольных каналов $H/B = 0,29$, относительной глубины единичных каналов $H/B = 0,23$; обрезка кромок и контроль основных геометрических размеров.

В Таблице 3 представлено сравнение некоторых статей затрат и трудоемкости существующего и предлагаемого технологических процессов формовки.

Таблица 3.

Сравнение некоторых статей затрат и трудоемкости существующего и предлагаемого технологических процессов формовки пластины теплообменника S32H

Параметр	Формовка эластичной средой (ПФЛ-100)	Формовка жестким штампом (X12M, HRC 58...62)
Стоимость изготовления оснастки, руб.	$\approx 400\ 000 \dots 500\ 000$	$\approx 800\ 000 \dots 1\ 200\ 000$
Время изготовления партии 20 шт., мин	20	135...205
Затраты на электроэнергию за партию 20 шт., руб.	5...10	1000...1500
Стоимость 1 изделия, руб. (без учета материала)	$\approx 800 \dots 1\ 000$	$\approx 1\ 650 \dots 2\ 475$

Можно отметить существенное снижение затрат на изготовление эластичного инструмента по сравнению с жестким металлическим инструментом (в 2...3 раза), а также существенное снижение числа операций и общей трудоемкости изготовления пластины теплообменника по предлагаемой технологии по сравнению с существующей технологией.

Применение разработанной методики проектирования процессов листовой штамповки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали с использованием эластичного инструмента из полиуретана в открытом и закрытом объемах, применение которой позволяет получать пластины с относительной глубиной каналов H/B до 0,3, снизить производственные затраты, сократить трудоемкость изготовления изделий в условиях единичного или мелкосерийного производства;

В заключении приведены основные результаты и выводы по работе.

Приложения содержат отдельные чертежи деталей экспериментальной оснастки, заключение о планируемом применении результатов работы на ООО «ЗАВОД ТЕРМОСИСТЕМЫ».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе изложены научно обоснованные технические решения, направленные на расширение технологических возможностей листовой штамповки пластин теплообменников с увеличенной относительной глубиной каналов из коррозионностойкой стали, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие энергомашиностроения страны.

1. На основе проведенного анализа существующих способов изготовления пластин теплообменников установлено, что основным недостатком штамповки (формовки) пластин в инструментальных (жестких) штампах является невозможность получения относительной глубины канала пластин более 0,18 и при толщине листовой заготовки от 0,8 до 1,2 мм. Одним из путей снижения производственных затрат, сокращения трудоемкости изготовления и повышения качества пластин теплообменников из коррозионностойких сталей является формовка эластичным рабочим инструментом (пуансоном) из полиуретана в открытом и закрытом объемах, применение которого обеспечивает получение пластины с увеличенной относительной глубиной каналов Н/В (до 0,3 и более) и высоким качеством поверхности.

2. В результате проведенных экспериментальных исследований характеристик неармированного полиуретана марок ПФЛ-100, СКУ-7Л и армированного полиуретана марок ПФЛ-100-А и СКУ-7Л-А при сжатии (осадке) было установлено увеличение силы осадки армированного полиуретана в 1,5...1,6 раз по сравнению с неармированным полиуретаном, что можно в дальнейшем использовать в технологических целях при формовке пластин теплообменников.

Также полученные характеристики полиуретанов (константы Муни-Ривлина C_{10} и C_{01}) в дальнейшем были использованы для разработки математических моделей эластичного инструмента из полиуретана в среде ANSYS. Было установлено, что при использовании армированного полиуретана происходит увеличение нормальных контактных напряжений на 25% по сравнению с неармированным.

Кроме этого, установленное расхождение экспериментальных и расчетных значений силы сжатия полиуретана, не превышающее 6%, позволило использовать построенные математические модели эластичного инструмента из полиуретана ПФЛ-100-S и ПФЛ-100-А для дальнейшего компьютерного моделирования процессов формовки пластин теплообменников.

3. В результате проведенных теоретических исследований были построены математические модели процессов формовки пластин теплообменника из коррозионностойкой стали в среде ANSYS, позволившие установить следующие особенности формоизменения, напряженно-деформированного состояния и силовые параметры процесса формовки с использованием эластичного инструмента из полиуретана:

- при формовке в закрытом объеме максимальная относительная глубина Н/В для продольных каналов и локальных углублений составила: для неармированного полиуретана ПФЛ-100-S – 0,26 и 0,17 соответственно; для армированного полиуретана ПФЛ-100-А 0,3 и 0,25 соответственно;

- применение армированного полиуретана при формовке в открытом и закрытом объемах позволяет увеличить интенсивность напряжений в заготовке на 7...16% и интенсивность деформаций в заготовке - на 3...8%, также получать каналы с относительной глубиной больше на 15% по сравнению с формовкой неармированным полиуретаном;

- при формовке армированным полиуретаном наибольшее утонение пластины теплообменника в вершинах продольных каналов достигает 8,7%, а в вершинах локальных углублений достигает 15,5%, что не превышает допустимых значений 20...25%;

- получены формулы для расчета потребного давления q формовки пластин теплообменников в открытом и закрытом объемах с использованием неармированного и армированного полиуретана в зависимости от относительной глубины каналов H/V и толщины t пластины теплообменника.

4. Проведенные экспериментальные исследования процесса формовки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали 08X18H10 с использованием эластичного инструмента позволили установить, что:

- формовка в закрытом объеме неармированным полиуретаном ПФЛ-100-S и армированным полиуретаном ПФЛ-100-A позволяет получать пластины теплообменников с относительной глубиной продольных каналов до $H/V = 0,31$ и локальных углублений до $H/V = 0,33$;

- утонение пластины теплообменника при экспериментальной формовке в закрытом объеме с помощью армированного полиуретана составило не более 18% и не превысило допустимых значений 20...25%;

- максимальная сила формовки в закрытом объеме, требуемая для получения каналов с относительной глубиной $H/V = 0,3$, при использовании армированного полиуретана ПФЛ-100-A на 10% меньше, чем при формовке неармированным полиуретаном ПФЛ-100-S;

- проведенное сравнение расчетных и экспериментальных значений и распределения утонения пластины теплообменника при формовке в закрытом объеме эластичным инструментом из неармированного полиуретана ПФЛ-100-S и армированного полиуретана ПФЛ-100-A позволило установить высокую сходимость полученных данных с расхождением не более 8...9%;

5. Получена область рационального применения формовки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали 08X17H13M2 (AISI 316) с использованием эластичного инструмента из полиуретана в зависимости от геометрических параметров деталей (относительной глубины каналов H/V и толщины t).

6. Разработана методика проектирования процессов листовой штамповки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали, определяющая область рационального применения формовки с использованием эластичного инструмента из полиуретана в открытом и закрытом объемах и применение которой позволяет получать пластины теплообменников с увеличенной относительной глубиной каналов (до 0,3 и выше).

Применение разработанной методики проектирования процессов листовой штамповки пластин теплообменников из коррозионностойкой стали с

использованием эластичного инструмента из полиуретана в открытом и закрытом объемах, применение которой позволяет получать пластины с относительной глубиной каналов Н/В до 0,3, снизить производственные затраты, сократить трудоемкость изготовления изделий в условиях единичного или мелкосерийного производства;

7. С использованием предложенной методики был разработан новый технологический процесс листовой штамповки пластины теплообменника S32H (относительная глубина продольных каналов Н/В = 0,29, относительная глубина единичных каналов Н/В = 0,23) из коррозионностойкой стали марки 08X17H13M2 (AISI 316) эластичным инструментом из армированного полиуретана ПФЛ-100-А в закрытом объеме.

Можно отметить существенное снижение затрат на изготовление эластичного инструмента по сравнению с жестким металлическим инструментом (в 2...3 раза), а также существенное снижение числа операций и общей трудоемкости изготовления пластины теплообменника по предлагаемой технологии по сравнению с существующей технологией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Семенов И.Е., Резнюк К.Д. Исследование напряженно-деформированного состояния тонколистовой заготовки при ее деформировании новым композитным рабочим инструментом // Заготовительные производства в машиностроении. 2022. № 3(20). С. 133-137. (0,31 п.л./ 0,25 п.л.).

2. Семенов И.Е., Брайко Д.А., Резнюк К.Д., Акперов К.И. Исследование механических характеристик цилиндрических образцов из эластичного композитного материала // Фундаментальные основы механики. 2023. № 12. С. 136-141. (0,38 п.л./0,19 п.л.).

3. Semenov I.E., Lavrinenko V.YU., Reznjuk K.D., Brayko D.A. Modeling of continuous molding process with elastic composite working tool // E3S Web Conf. 2023. Volume 413, № 02006. (0,38 п.л./0,19 п.л.).

4. Семенов И.Е., Резнюк К.Д. Экспериментальные исследования механических свойств композитного эластичного инструмента на основе полиуретана для листовой штамповки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2025. № 2(370). С. 46-51. (0,38 п.л./0,30 п.л.).

5. Семенов И.Е., Резнюк К.Д. Формовка тонколистовых изделий с увеличенной глубиной каналов с помощью композитного инструмента на основе полиуретана. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. Вып. 2. С. 665-673. (0,56 п.л./0,46 п.л.).

6. Резнюк К.Д. Технология изготовления пластин теплообменников с увеличенной глубиной каналов методом локальной формовки эластичным инструментом // Инновационные технологии, оборудование и материалы. (МашТех-2025). 2025. Т. 1. С. 264-268. (0,31 п.л.).

7. Резнюк К.Д. Разработка технологии листовой штамповки пластин теплообменников эластичным инструментом из полиуретана // Заготовительные производства в машиностроении. 2026. Т. 24, № 6. С. 268-272. (0,40 п.л.).