

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
Политехнический институт  
Факультет Материаловедения и металлургических технологий  
Кафедра процессов и машин обработки металлов давлением

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Рецензент

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Л.В. Радионова

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

***РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГОФРИРОВАННЫХ ТОНКИХ ЛЕНТ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛАСТИЧНЫХ СРЕД***

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ – 22.04.02.2018.186.00.00.00 ПЗ

*Руководитель работы:*

\_\_\_\_\_ / А.П. Пелленен /

*Автор работы*

\_\_\_\_\_ / Б.А. Яров /

*студент группы П-244*

Челябинск

2020

## АННОТАЦИЯ

Яров Б.А. Разработка и исследование технологии изготовления гофрированных тонких лент с использованием эластичных сред. – Челябинск: ЮУрГУ, ПИ, ПиМОМД, 2020. – 67 с., 39 ил., библиогр. список – 50 наим., 2 прил., 3 листа чертежей ф. А1,

В данной выпускной квалификационной работе произведен обзор литературы и мировые производители теплообменных аппаратов для микрогазотурбинных энергоустановок. Проработана технология и линия для получения гофрированных полос.

Произведен оценочный эксперимент, показавший перспективность способа получения гофр с помощью прокатки полос между профилированным жестким валком и жестким валком с гладкой бочкой, на который натянута лента из эластичного материала. Где в очаге деформации происходит локальная вытяжка листа с помощью эластичного материала.

Получены первые результаты моделирования процесса гофрирования с помощью метода конечных элементов.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1.	ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....	7
1.1.	Конструкции теплообменных аппаратов .....	7
1.2.	Типы рекуператоров для микрогазотурбин .....	9
1.3.	Первичные поверхностные рекуператоры .....	9
1.4.	Пластинчато-ребристые рекуператоры .....	12
1.5.	Трубчатые рекуператоры .....	13
1.6.	Сравнение рекуператоров .....	14
1.7.	Подбор и изготовление материалов для рекуператоров.....	15
1.8.	Способы получения гофрированных лент .....	20
2.	ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	25
3.	РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ГОФРИРОВАННЫХ ПОЛОС ТРЕБУЕМОГО ПРОФИЛЯ.....	26
3.1.	Описание опытного стана .....	27
3.2.	Изготовление бандажных профилированных пластин. ....	28
4.	ЭКСПЕРИМЕНТ .....	32
4.1.	Выводы экспериментальной работы.....	38
5.	РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ.....	40
5.1.	Определение геометрических параметров очага деформации.....	40
5.2.	Методика определения энергосиловых параметров .....	43
6.	РАЗРАБОТКА КОМПОНОВКИ ЛИНИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ГОФРИРОВАННЫХ ПОЛОС .....	47
7.	МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОФРИРОВАНИЯ.....	50
	ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	56



## ВВЕДЕНИЕ

Теплообменными аппаратами называются устройства, предназначенные для передачи теплоты от теплоносителя первичного к теплоносителю вторичному с целью осуществления различных тепловых процессов (нагрева, охлаждения, кипения, конденсации и т. д.).

Теплообменный аппарат состоит из теплопередающей части, предназначенной для осуществления основного процесса теплообмена, и коллекторов, то есть частей, не участвующих в этом процессе, однако необходимых для подвода и отвода теплообменивающихся сред.

Спиральные теплообменники получили в промышленности сравнительно широкое распространение, что объясняется рядом важных преимуществ их по сравнению с теплообменными аппаратами других типов.

Спиральные теплообменники могут изготавливаться из любого рулонного материала, подвергаемого холодной обработке и свариванию. Теплообменники компактны, их конструкция предусматривает возможность полного противотока. Площадь поперечного сечения каналов по всей длине остается неизменной, и поток не имеет резких изменений направлений, благодаря чему загрязнение поверхности спиральных теплообменников меньше, чем теплообменных аппаратов других типов, кроме того, ряд конструкций их позволяет проводить сравнительно легкую очистку в случае, не требующем для удаления осадка механического воздействия. Гидравлическое сопротивление спиральных теплообменников при одинаковой скорости движения жидкости меньше, чем у кожухотрубчатых.

В данной работе предложен способ получения пластин спирального теплообменного аппарата путем прокатки между формующим валком и эластичным материалом, таким образом, данная технология является аналогом штамповки эластичной средой с той разницей, что процесс не является периодическим и эластичный материал не имеет ограничений в направлении течения.

В работе предложен способ изготовления формующего вала с прикрепленными к нему бандажными пластинами на поверхности которых сформирован профиль требуемого канала спирального теплообменного аппарата. Этот экономичный способ изготовления, в дальнейшем, даст возможность варьировать параметрами геометрии каналов теплообменного аппарата (ТОА). Проанализирована схема деформации эластичного материала и пластин ТОА и подобран эластичный материал.

Также с помощью метода конечных элементов в пакете LS-Dyna проанализирована схема напряженно-деформированного состояния получаемых пластин.

В работе предложена технология для изготовления гофрированных полос для многоцелевых малогабаритных спиральных теплообменных аппаратов нового поколения для газотурбинных установок и систем рекуперации тепла.

## 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

### 1.1. Конструкции теплообменных аппаратов

Распределенная выработка электроэнергии имеет большой потенциал для развития отдаленных регионов, секторов обслуживания, домашних хозяйств и малых предприятий [1–3], чья общая эффективность может быть дополнительно улучшена с учетом систем когенерации и тригенерации [4]. Эта технология уже изучена во всем мире [5–8], и было предпринято много усилий для содействия распределенной генерации энергии в ответ на проблему изменения климата и необходимость расширения разнообразия источников энергии [9].

В настоящее время двигатели внутреннего сгорания наиболее широко используются в качестве небольших систем преобразования энергии из-за их относительно низкой цены, но в основном они ограничены высокими выбросами загрязняющих веществ, низкой гибкостью используемого топлива и надежностью. Микрогазотурбины (мощность менее 500 кВт [10]) в большей степени подходят для распределенной выработки электроэнергии, выброс загрязняющих веществ которых значительно ниже, чем у двигателей внутреннего сгорания [11]. Как традиционные виды топлива, такие как природный газ, синтез-газ и дизельное топливо, так и возобновляемый биогаз и биомасса, также могут быть использованы для микрогазотурбин [12–15]. Хотя микротурбинные системы имеют многообещающее применение из-за их компактного размера, гибкости системы, низкого уровня выбросов, высокой надежности и возможности использования нескольких видов топлива, их эффективность и стоимость по-прежнему являются основными проблемами для широкомасштабного использования этой технологии.

Типичная микрогазотурбинная система в основном состоит из центробежного компрессора, радиальной турбины, камеры сгорания, рекуператора и высокоскоростного генератора, как показано на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема микротурбинной системы

Компрессор, турбина и генератор расположены на одном валу, что делает двигатель очень компактным. Из-за небольшого размера турбины лопатки не охлаждаются воздухом, а температура на входе в турбину ограничена характеристиками материала, обычно ниже  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  для жаропрочных сплавов. Рекуператор представляет собой компактный теплообменник, который подогревает сжатый воздух перед его поступлением в камеру сгорания за счет рекуперации тепла из отработанного газа, что снижает расход топлива и увеличивает КПД. Этот параметр для микрогазотурбин обычно составляет 16–20% без рекуператоров и примерно 30% с рекуператорами [2]. Отмечено, что рекуператор составляет 25–30% от общей стоимости [16] и является одним из ключевых компонентов системы микрогазотурбин для достижения приемлемых характеристик [17]. Таким образом, существует потребность в разработке высокоэффективных и не дорогих рекуператоров.

Рекуператор для микрогазотурбин требует высокой эффективности теплопередачи ( $> 90\%$ ), низкой относительной потери давления ( $< 3\%$ ), хорошей стойкости к окислению и ползучести при высокой температуре ( $> 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), компактной облегченной матрицей при низкой стоимости и т. д. Кроме того, микрогазотурбины могут использоваться в различных областях и эксплуатироваться в различных условиях. С быстрым развитием



микрогазотурбин, используемых в области систем возобновляемой энергии, адаптивные и гибкие методы проектирования рекуператоров заслуживают большего внимания, особенно для различных номинальных мощностей, часто меняющихся условий работы (запуск, останов и регулирование нагрузки) и разные рабочие среды (воздух, газ, паровоздушная смесь и т. д.).

В нашей стране, на сегодняшний день, работы по разработке рекуператоров для микрогазотурбинных установок идут не самым успешным образом. В нижеследующем обзоре литературы будут рассматриваться иностранные производители рекуператоров (теплообменных аппаратов) для микрогазотурбинных установок.

### 1.2. Типы рекуператоров для микрогазотурбин

На протяжении более полувека газовые турбины широко использовались в областях производства электроэнергии, механических приводах и силовых установках самолетов, а теплообменники всегда играли важную роль с точки зрения эффективности системы [18]. Первоначальные теплообменники, которые использовались в газотурбинных системах, включая рекуператоры, были в основном разработаны на основе технологии котлов, но применимость этих теплообменников ограничена из-за их громоздких размеров, низкой надежности и высокой стоимости [19]. По этой причине в последнее время было предложено много новых типов рекуператоров с меньшими размерами, более низкой стоимостью и более высокой эффективностью. Они обычно классифицируются на три типа в соответствии с геометрией их поверхности теплопередачи, то есть первичные поверхности, пластинчатые и трубчатые рекуператоры.

### 1.3. Первичные поверхностные рекуператоры

Рекуператоры с первичной поверхностью представляют собой тип пластинчатого теплообменника, в котором пластины крепятся болтами, привариваются или паяются для разделения холодной и горячей жидкостей.

Как правило, существует три типа рекуператоров первичной поверхности: перекрестно-гофрированные (ПГ), гофрированно-волнистые (ГВ) и поперечно-волнистые (ПВ), как показано на рисунке 2.

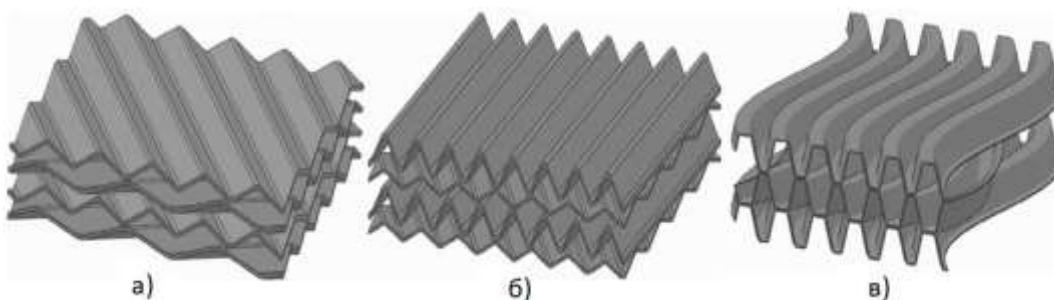


Рисунок 2. Типы рекуператоров первичной поверхности:

а – поперечно-гофрированной поверхности, б – гофрированно-волнистой поверхности, в – поперечно-волнистой поверхности.

Компания RSAB разработал полностью сварной рекуператор первичной поверхности, как показано на рисунке 3 а [20]. Этот рекуператор представляет собой противоточный теплообменник с конфигурацией воздуховода ПГ, а матрица теплообменника состоит из тонких пластин из нержавеющей стали, герметизированных лазерными сварными швами. Впускной и выпускной коллекторы воздуха приварены к сердечнику рекуператора. Концевые балки и некоторые соединительные стержни расположены таким образом, чтобы выдерживать внутреннее давление воздуха и предотвращать чрезмерное напряжение. Honeywell Corporation разработала рекуператор противотока с первичной поверхностью, как показано на рисунке 3 б [2]. В этом устройстве пластины ПГ, которые используются в основной области теплопередачи, приварены по периферии.

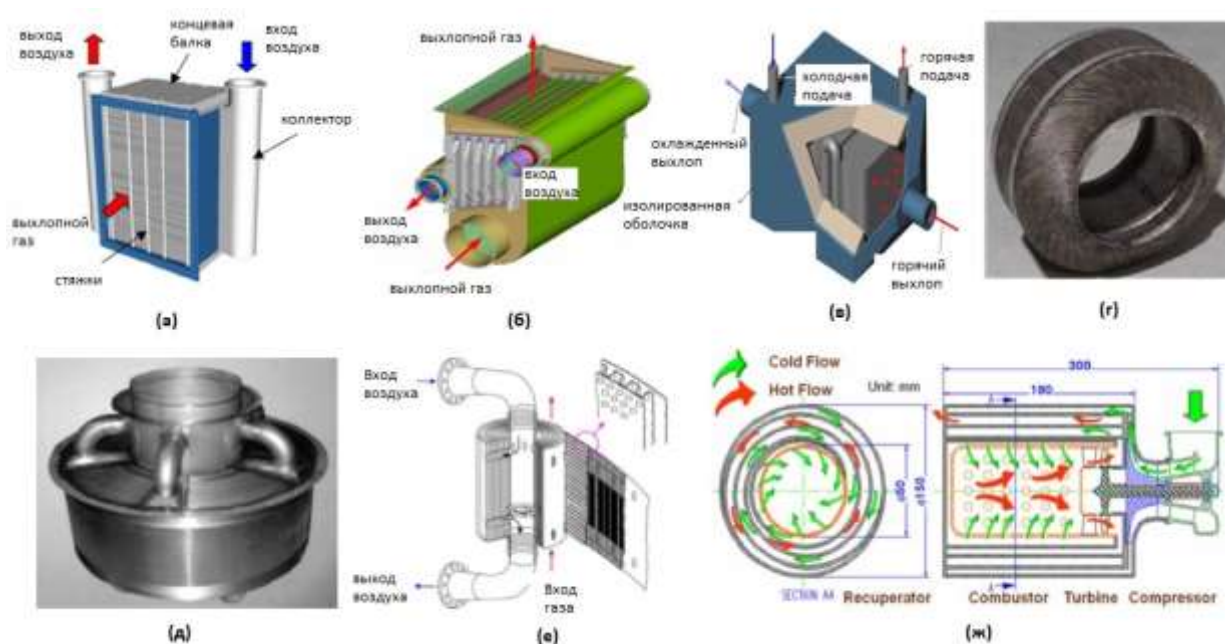


Рисунок 3. Фотографии рекуператоров:

а – RSAB, б – Honeywell, в – SiC, г – Capstone, д – АСТЕ, е – Rolls-Royce, ж – Swiss-Roll.

Уилсон и соавторы [21] сконструировали микроканальный рекуператор пластинчатого типа на основе карбида кремния, как показано на рисунке 3 в, и обнаружили, что общий КПД можно увеличить с 27% до более 40%, поскольку температура на входе горячего газа может достигать 955 °С. Capstone Turbine Corporation начала серийное производство рекуперативных микрогазотурбин в 1998 году [22]. Эти рекуператоры представляют собой первичные поверхности с кольцевыми и полностью сварными узлами, которые имеют преимущество минимального воздуховода, простоты и компактности, как показано на рисунке 3 г. Компания АСТЕ разработала спиральный рекуператор для применения в микрогазотурбинных установках, как показано на рисунке 3д [23]. Этот рекуператор представляет собой цельносварную конструкцию, которая образует сердцевину, состоящую из пары гофрированных листов для создания двух спиральных камер и коллекторов подачи воздуха. Целостность конструкции усиливается точками контакта, а теплопередача - турбулентностью, создаваемой гофрированными спиральными пластинами. Компания Rolls-Royce также разработала

спиральный рекуператор, как показано на рисунке 3 е. Воздух попадает в верх и идет вниз, а газ входит в спираль снизу и идет вверх с гофрами на стороне газа и узкой первичной поверхностью на стороне воздуха более высокого давления. Эта структура способна обеспечить высокий коэффициент теплопередачи и низкий перепад давления [24]. Рекуператор Swiss-Roll - это другой тип рекуператора с первичной поверхностью, как показано на рисунке 3 ж, который состоит из двух плоских пластин, которые намотаны друг на друга, создавая два концентрических канала прямоугольного сечения [25].

#### 1.4. Пластинчато-ребристые рекуператоры

Пластинчато-ребристый рекуператор представляет собой блок из листов металла, которые собраны с небольшими зазорами. Воздушные каналы образуются с помощью продольных ребер, которые расположены между пластинами. Холодный и теплый воздух не смешиваются, а теплоотдача идет от пластин. Рекуператоры делятся по направлению воздуха на прямоточные, противоточные и перекрестные. Компания Ingersoll-Rand начала разрабатывать рекуператоры с пластинчатыми ребрами в 1994 году, в которых используются смещенные ребра в области теплообмена, как показано на рисунке 4 [26].

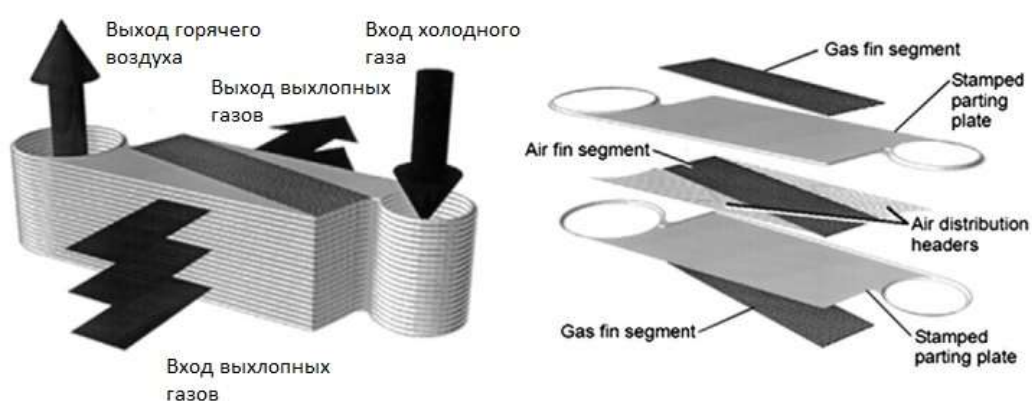


Рисунок 4. Пластинчато-ребристые рекуператоры:

а – схема течения потока, б – элементарная ячейка рекуператора Ingersoll-Rand.

## 1.5. Трубчатые рекуператоры

Трубчатые рекуператоры состоят из ряда трубок внутри внешней оболочки. Proe Power Systems разработала рекуператор Proe 90TM [28]. Как показано на рисунке 5 а, этот рекуператор состоит из двух коллекторов 1, расходомерных трубок низкого и высокого давления 2 и 3 и теплообменных сборок 4, которые состоят из четырех трубок, для трех concentрических кольцевых путей потока.

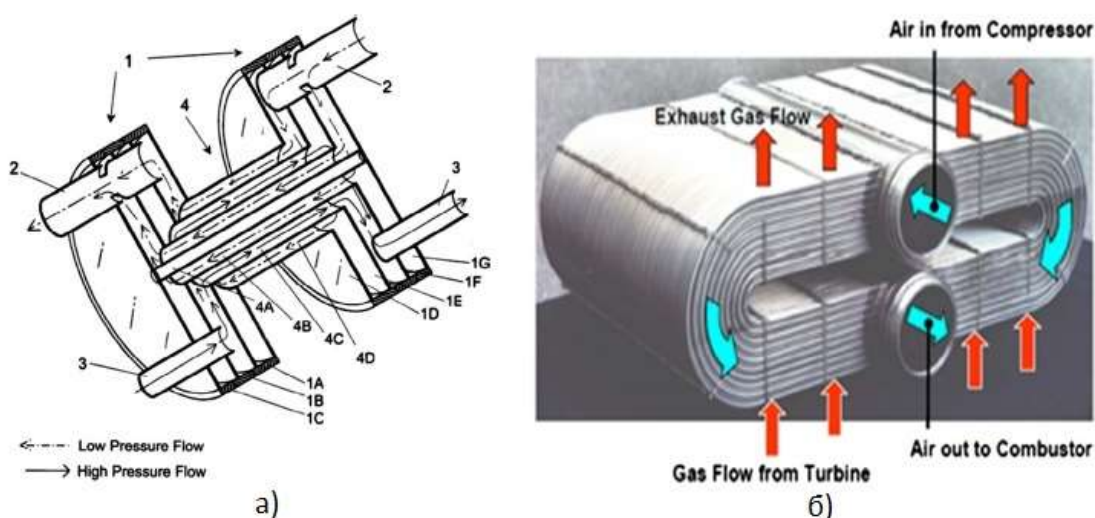


Рисунок 5. Схемы трубчатых рекуператоров.

Аналитическими методами были установлены теплопередачи и потери давления, а также была предсказана производительность рекуператора 30 кВт. Результаты показали, что эффективность может достигать 95%, а перепад давления очень низок. Компанией MTU был разработан рекуператор с перекрестным противотоком, который состоял из двух коллекторных трубок и пучка профильных трубок [28]. Сжатый холодный воздух подается по трубам и коллекторам к профилированным трубам, в то время как горячий газ течет в пространствах между трубками, как показано на рисунке 5 б. Отличительными особенностями этого рекуператора являются его высокая компактность и высокая устойчивость к тепловым градиентам. Однако такая компоновка тяжелая и заметно увеличивает общий вес.

## 1.6. Сравнение рекуператоров

Пластинчато-ребристые рекуператоры с первичной поверхностью могут достигать довольно высокой эффективности, но все же имеют некоторые недостатки [28]. Крышки рекуператоров дороги в изготовлении и их трудно собрать из-за большого количества пластин. Сварные швы с высокой нагрузкой, используемые для герметизации, создают риск утечки и разрушения. Кроме того, нагрузка от давления на стороне высокого давления может возникать из-за неправильной формы пластин, потому что прочность при ползучести низкая при рабочих температурах, что влияет на срок службы рекуператоров.

Трубчатые рекуператоры имеют высокую надежность, но обычно они очень большие и громоздкие. Поэтому трубчатые рекуператоры редко используются для коммерческих микрогазотурбин. Рекуператоры с первичной поверхностью были приняты многими производителями микрогазотурбин, и их эффективность приближается к 90% с общей потерей давления, которая обычно составляет менее 5%.

Утриайнен и Сунден [29] сравнили термогидравлические характеристики трех рекуператоров с первичной поверхностью (ПГ, ГВ и ПВ) и рекуператора со смещенными полосовыми ребрами. Результаты показали, что поверхность ПГ показала превосходные характеристики по сравнению с другими типами поверхностей. Рекуператоры ПГ имели минимальный удельный объем матрицы для данной конкретной эффективности рекуператора. Ван и соавторы [30] провели экспериментальные исследования теплообмена и перепада давления в рекуператоре микрогазотурбинной установки с каналами первичной поверхности непрерывного действия. Эти авторы получили средние числа Нуссельта и корреляции коэффициента трения с числами Рейнольдса. По их мнению, рекуператоры с каналами первичной поверхности ПВ достигли приемлемого компромисса между теплопередачей и характеристиками перепада давления, что могло бы стать потенциальным

выбором для будущих микрогазотурбин. Однако в более поздней работе [31] авторы пришли к выводу, что первичные поверхности ПГ показали превосходную производительность по сравнению с первичными поверхностями ПВ. Согласно предыдущей работе, первичные поверхности могут быть подходящим выбором для будущего развития рекуператора.

#### 1.7. Подбор и изготовление материалов для рекуператоров

Максимальная рабочая температура рекуператоров зависит от коррозии, окисления и сопротивления ползучести используемого материала. Для нержавеющей стали максимальная температура  $<650^{\circ}\text{C}$ , инконель  $<800^{\circ}\text{C}$ , керамика  $>870^{\circ}\text{C}$  [31].

В обзорной статье [32] приведен анализ материалов используемых для производства рекуператоров микрогазотурбин, в которой сказано, что сплавы иностранного производства, такие как сплав 120 и модифицированный сплав 803 являются лучшим вариантом. При использовании биметаллического материала, где только горячий конец рекуператора требует дорогостоящего суперсплава, а холодный конец изготовлен из сплава 347SS. Как утверждает Макдональд [34], КПД микрогазотурбин с рекуператорами, состоящими из 23% Inconel 625 и 77% 347SS, может быть увеличен с 30% до 35%. Сварка широко используется в производстве рекуператоров.

Макдональд [18] предложил кольцевой рекуператор первичной поверхности включающий только пять основных частей, матрица была сформирована путем непрерывной штамповки, фальцовки и сварки. Рифленый металлический лист был изготовлен штамповкой, а матрица образована путем складывания гофрированного металлического листа в разные стороны с герметичной внешней сваркой. В статье [22] авторы применили аналогичную процедуру для изготовления кольцевых рекуператоров с первичной поверхностью для коммерческих газовых микротурбин Capstone.

Теплообменники с вытравленными каналами (PCHE) имеют каналы с гидравлическим диаметром около 1 мм, используя фотохимическое травление и метод диффузионного соединения [35]. PCHE может использоваться в качестве рекуператора из-за компактного теплообменника с хорошими теплообменными характеристиками и долговечностью при высоких давлениях.

Процесс производства по технологии Selective Laser Melting (SLM), является быстрым методом производства для компактных теплообменников со сложной геометрией и имеет низкий перепад давления и улучшенные свойства теплопередачи [36-38]. В статье [39] авторы изготовили теплообменник с поперечным потоком с использованием SLM с использованием порошка из нержавеющей стали, и результаты эксперимента показали, что удалось достичь объемного коэффициента теплопередачи 3,14 мВт / (м<sup>3</sup> К). Хотя SLM все еще находится в стадии разработки, технология может обеспечить специально разработанные теплообменники небольшого объема, которые очень подходят для быстрого изготовления экспериментальных рекуператоров с различной геометрией, которые не могут быть изготовлены другими методами.

Керамические рекуператоры превосходят металлические рекуператоры по механическим и коррозионным свойствам при высокой температуре и улучшают КПД микрогазотурбин, приближаясь к 40%. Керамические рекуператоры были разработаны с начала 1970-х годов [40-42]. В статье [43] авторы предложили керамический микроканальный рекуператор с керамикой, полученной из полимера (SiCN), которая может оставаться термически стабильной до 1300 °С в газе сгорания.

Пример базовой керамической пластины, включая канал для потока газа, коллектор и коллектор, показан на рисунке 6 (а), и эти пластины затем укладывают друг на друга, чтобы сформировать матрицу рекуператора, как показано на рисунке 6 (б).





Рисунок 6. Керамическая пластина (а) и рекуператорная матрица (б)

В статье [44] приведен способ изготовления керамических рекуператоров, который можно разделить на три этапа: лазерную резку тонких листов отлитого из ленты материала по сложным узорам, ламинирование их вместе в стопки и спекание при высокой температуре.

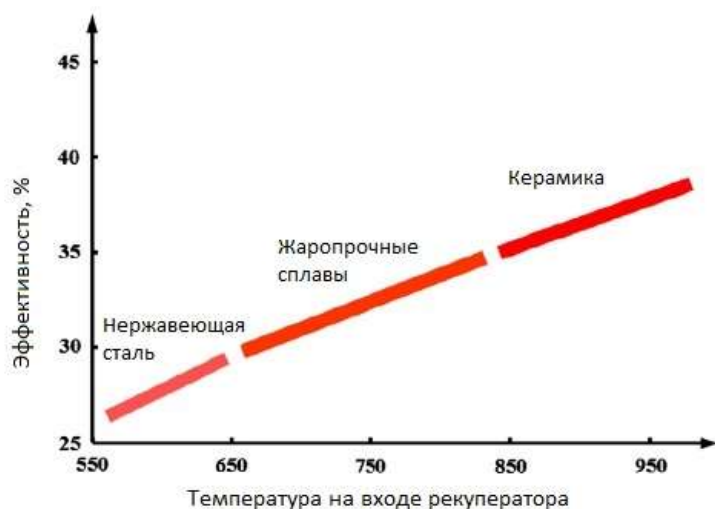


Рисунок 7. Влияние температуры на входе в рекуператор.

Значительный прогресс, достигнут в разработке керамических матричных композитных компонентов для авиационных турбинных двигателей [47-47], которые также могут быть использованы для рекуператоров и микротурбин.

Выбор материала и производство - две основные связанные проблемы, и все еще требуются значительных усилия для разработки надежных и недорогих керамических рекуператоров. Эффект рекуператор-впускная

температура (самая высокая температура для рекуператора) показана на рис. 7 [33,34,40-43], а суперсплавы и керамические рекуператоры предпочтительны для дальнейшей разработки.

Керамические рекуператоры превосходят металлические рекуператоры по механическим и коррозионным свойствам при высокой температуре ( $> 870$  °C), что, как ожидается, будет способствовать повышению общей эффективности, приближающейся к 40%. Выбор материала и процесс производства, вероятно, являются двумя основными проблемами для керамических рекуператоров, и все еще требуются значительные усилия для разработки отработанных, надежных и недорогих керамических рекуператоров.

Микрогазотурбины, вероятно, получат значительное улучшение после разработки недорогих и высоконадежных керамических компонентов, таких как рекуператоры и лопатки турбин. Металлический экономичный рекуператор первичной поверхности является в настоящее время вариантом для достижения эффективности 30–35%. Что касается коммерческих рекуператоров, то снижение затрат, веса или падения давления всегда является проблемой. Кроме того, адаптируемая и гибкая конструкция рекуператоров является еще одной проблемой для микрогазотурбин, используемых в распределенных и возобновляемых источниках энергии.

Между тем технологии 3D-печати и теплообменников с печатными платами заслуживают дополнительных исследований в области производства рекуператоров. Эти новые технологии для рекуператоров позволят значительно повысить производительность микрогазотурбин, снизить стоимость и повысить конкурентоспособность по сравнению с другими двигателями, такими как двигатели внутреннего сгорания и двигатели Стирлинга.

В представленном обзоре рекуператоров, охватывающий типы рекуператоров, выбор материала и производство можно выделить основные моменты:

- Рекуператоры первичной поверхности имеют наибольший интерес среди обсуждаемых типов из-за хорошей компактности и эффективности;
- Требуемый рекуператор для микрогазотурбин требует высокой эффективности теплопередачи ( $> 90\%$ ),
- низкой относительной потери давления ( $< 3\%$ ),
- хорошей стойкости к окислению и ползучести при высокой температуре ( $> 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).
- компактной легкой матрицы при низкой стоимости.

На сегодняшний день в Российской Федерации не производятся эффективные теплообменники первичной поверхности для микрогазотурбин (мощность менее 500 кВт). Выпускаемые нашей промышленностью пластинчатые и спиральные теплообменники (рисунок 8) громоздки и дороги в производстве, а технология их производства осталась на уровне 70-х годов прошлого века. Требуется создание новых эффективных рекуператоров отвечающих всем требованиям.



Рисунок 8. Спиральный теплообменник российского производства.

## 1.8. Способы получения гофрированных лент

На сегодняшний день существует большое количество способов получения гофрированных лент. В вышеприведенном обзоре при производстве гофрированных пластин применяется операция штамповки что, по мнению автора, является экономически неоправданным. Штамповка производится на прессах или специальных прессах автоматах в специализированных штампах сложной конструкции (рисунок 9) [48]. После процесса штамповки следует процесс трудоемкой сборки и сварки.

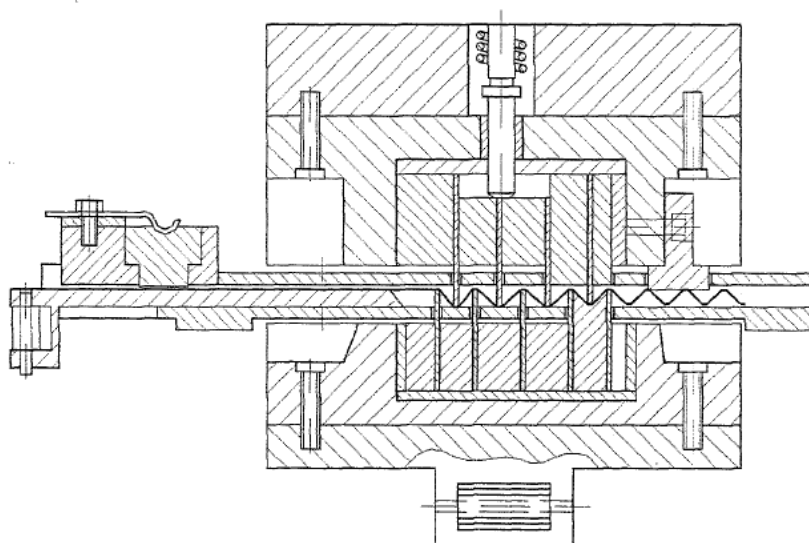


Рисунок 9 – Штамповка ленты с мелкогофрированным профилем.

Наиболее подходящим с экономической точки зрения является способ прокатки между профилированным жестким валком и жестким валком с гладкой бочкой, на который натянута лента из эластичного материала (рисунок 10 а). Где в очаге деформации происходит локальная вытяжка листа с помощью эластичного материала.

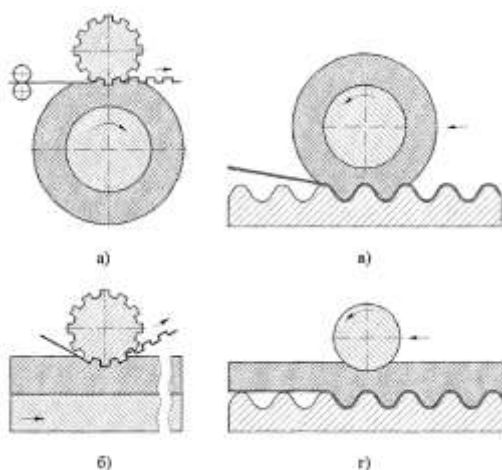


Рисунок 10 – Процессы прокатки эластичными средами.

Автором в 2014 году уже была проделана работа по штамповке пластин рекуператора с помощью эластичной среды в закрытом контейнере, на нержавеющей листе 12Х18Н10Т, толщиной 0,2 мм. Вытяжка составила 1,5 мм, полученные пластины представлены на рисунке 11. Габариты пластин 500х400 мм, прессование производилось на испытательном прессе ПСУ-500, усилие штамповки достигало 400 тонн. Производительность составила 30-35 пластин в смену.



Рисунок 11. Пластины рекуператора полученные вытяжкой эластичной средой.

Среди всех вышеперечисленных рекуператоров выделяется спиральный рекуператор фирмы АСТЕ, спиральная форма навивки которого позволяет создать самоподдерживающуюся термокомпенсированную конструкцию, выдерживающую высокие давления при высоких температурах среды.

На демонстрационном видеоролике [49] показана производственная линия, где можно увидеть процесс получения гофрированной стальной ленты, линия напоминает прокатный стан, где процесс деформации выполняется с помощью эластичного материала. Сварка торцов гофрированной ленты осуществляется сразу на прокатном стане (рисунок 12), также для увеличения жесткости по поверхности гофры произведена контактная сварка двух гофрированных лент, создающих замкнутые каналы теплообменного аппарата.

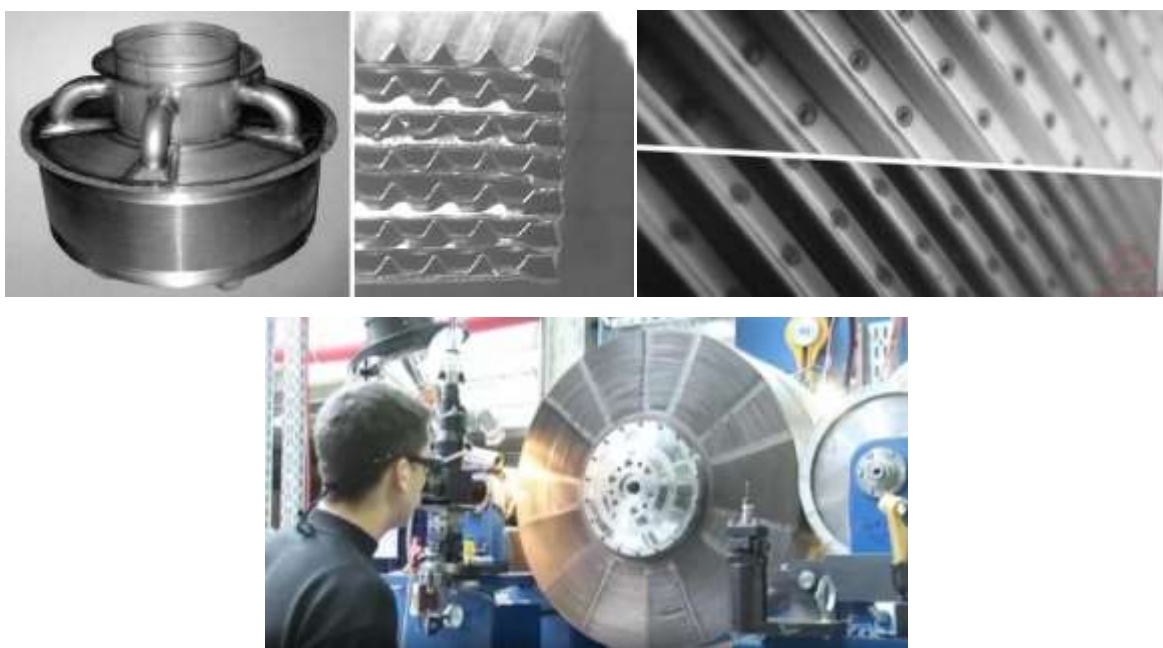


Рисунок 12 – Пластинчатый рекуператор АСТЕ.

Вопрос разработки технологии получения спиральных ТА для микротурбинных энергоустановок был рассмотрен одним из производителей газотурбинных двигателей (РФ). В итоге были сформированы ориентировочные технические требования, предъявляемые к данным теплообменникам.

Разрабатываемая Технология предназначена для производства теплообменников обеспечивающих эксплуатацию в составе систем рекуперации и утилизации тепла газотурбинных установок малой мощности (до 2,5 МВт) при температуре рабочего процесса до 700°C и давлений до 1,5 МПа с тепловой эффективностью более 90% и низкими потерям давления

(<5%) в течение не менее 40000 часов и удельным энергоемкостью конструкции до 3,0 МВт/м<sup>3</sup>.

Планируемый к производству теплообменный аппарат (рекуператор) изготавливается методом непрерывной спиральной тонколистовой (0,2-0,3 мм) намотки двух пластин скрепляемых лазерной сваркой до заданных диаметральных размеров и требуемой площади теплообмена (тепловой мощности). Подобное производство обладает большой производительностью, гибкостью и высоким коэффициентом использования металла.

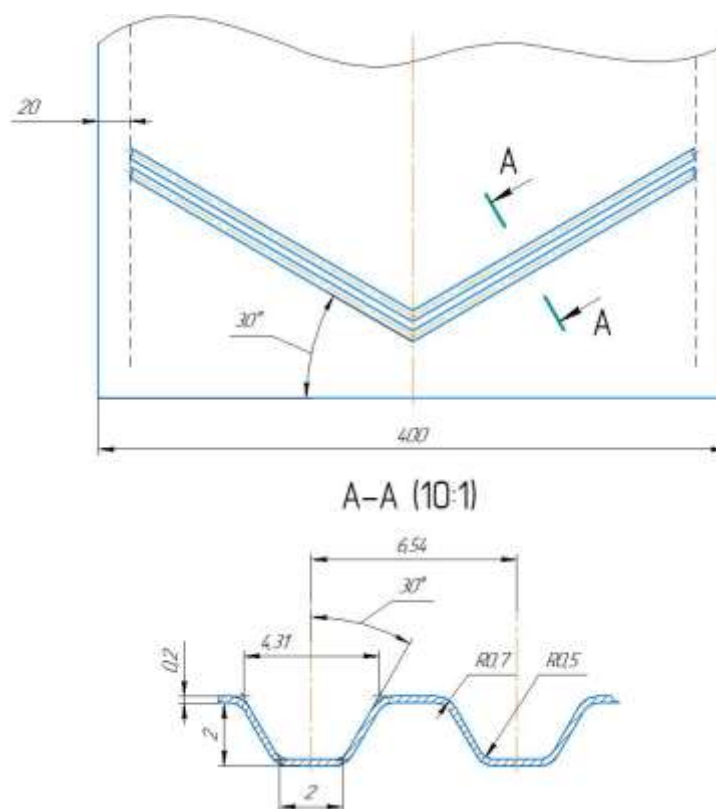


Рисунок 13 – Профиль гофры требуемой конфигурации

Применение тонколистовой нержавеющей стали со специальным образом спрофилированными каналами (рисунок 13) обеспечивает высокие коэффициенты теплопередачи между средами и низкие сопротивления, теплообменник должен быть реализован по методу спиральной намотки. Указанные решения позволяют достичь в конструкции высокой энергоемкости — до 3,0 МВт/м<sup>3</sup> и производить по единой технологии намотки рекуператоры с тепловой мощностью от 30 кВт до 1,0 МВт.

Глубина вытяжки 2 мм, не была достигнута в ходе первых экспериментов, приведенных ниже. Причиной тому, как считает автор данной работы, являются применяемые эластичные материалы. Сама геометрия профиля выбрана в качестве оценочной, так как имеет узкий профиль, ширина около 4 мм и большую глубину вытяжки, что несомненно является сложной задачей для такой операции как «вытяжка эластичной средой», где ЭМ не ограничен в расширении в боковые стороны.

Основным материалом для проведения эксперимента выбрана нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т поставляемая в рулоне, толщина ленты 0,2 мм, так как имеет приемлемую цену и имеет хорошие характеристики в плане свариваемости, механических свойств и жаростойкости.



## 2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной исследовательской работы является апробация метода вытяжки гофрированных полос с помощью эластичной среды между гладким и профилированным валком. В ходе выполнения данной работы планируется получить максимальную вытяжку при имеющихся эластичных материалах. Определить, как влияет толщина и наличие армирования в эластичном материале на глубину вытяжки и наличие дефектов. Оценить влияние наклона профиля зуба, натяжения заднего и переднего конца полосы на образование замятий. Произвести моделирование процесса с помощью пакета МКЭ LS-Dyna.

Также планируется описать технологию получения гофрированных полос для теплообменных аппаратов с учетом полученных данных в ходе проведения эксперимента.

### 3. РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ГОФРИРОВАННЫХ ПОЛОС ТРЕБУЕМОГО ПРОФИЛЯ

Для получения гофрированной стальной ленты шевронного типа приближенной по форме профиля к готовому изделию требуется изготовить дорогостоящий профилированный стальной валок, 3d модель шевронного профиля изображена на рисунке 14. Очевидно, что для изготовления данного вала потребуется зубофрезерный станок с дисковой фрезой, заточенной под требуемый профиль, либо 5-ти осевой обрабатывающий центр.

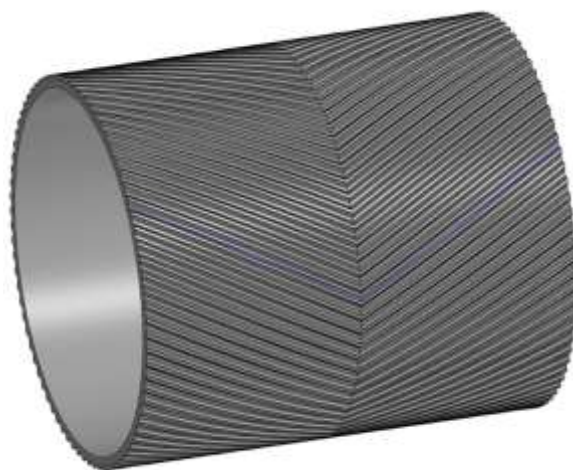


Рисунок 14. 3d модель шевронного профиля.

Чтобы снизить затраты на проведение эксперимента, было решено изготавливать стальные бандажные пластины с выфрезерованными пазами. Для проведения эксперимента требовалось снизить трудоемкость изготовления бандажных пластин, полная ширина сборки вместе с двумя ограничивающими бандажными пластинами равнялась 110 мм. Диаметр бочки вала равен 180 мм, полный наружный диаметр вала с бандажными пластинами 192 мм. Диаметр нижнего вала 250 мм.



Рисунок 15. 3d модели валков с бандажными пластинами.

На рисунке 15 изображена 3d модель валка с собранным пакетом бандажных пластин, крепление пластин к валку осуществляется с помощью шпилек М8, пакет не ограничен от смещения в направлении оси валка.

### 3.1. Описание опытного стана

Для проведения эксперимента был выбран стан холодной прокатки ХПЛ-200, кафедры ПиМОМД ЮУрГУ. Эскиз стана приведен на рисунке 16.

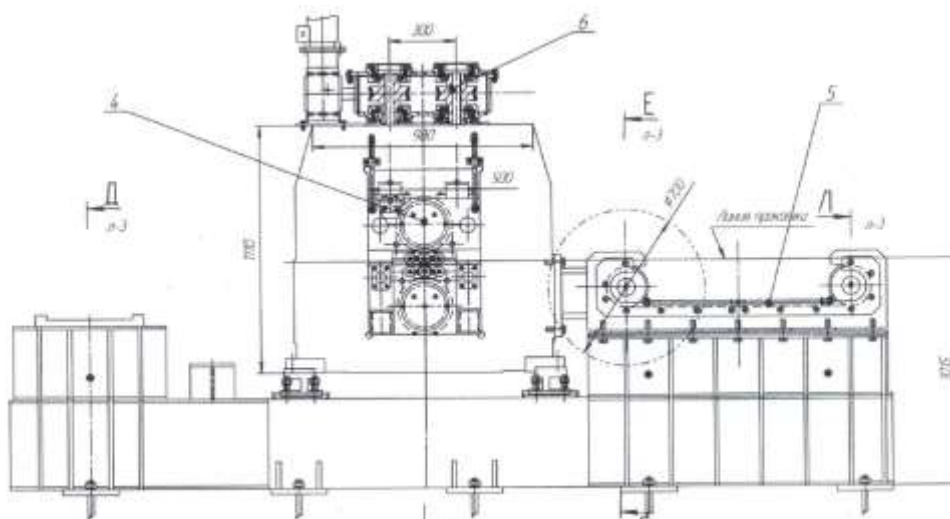


Рисунок 16. Эскиз стана ХПЛ – 200.

Параметры стана приведены ниже:

- Диаметр рабочих валков  $d=180$  мм – вариант дуо, 60 мм в варианте кварто.
- Диаметр опорных валков  $D=250$  мм.
- Длина бочки валков  $L=200$  мм.
- Скорость прокатки -до 1 м/с
- Максимальная ширина ленты — 4 мм
- Максимальное натяжение ленты 10 кН
- Максимальное усилие прокатки — 400 кН
- Охлаждение валков – эмульсионное

Во время эксперимента приводным валком являлся только верхний валок, так как диаметры валков не одинаковы.

### 3.2. Изготовление бандажных профилированных пластин.

С целью экономии и снижению трудозатрат в качестве материала пластин была выбрана сталь 3сп, пластина была изготовлена из листа толщиной 6 мм при помощи лазерной резки без дальнейшей механической обработки, что в дальнейшем сказалось на геометрии выфрезерованного профиля.

Фрезерование готового профиля производилось на токарном станке ИЖ 1И611П с применением штанги с закрепленным к нему резцом, заточка которого повторяет профиль требуемого паза. Фотография штанги и резца изображена на рисунке 17.



Рисунок 17. Штанга с профилированным резцом.

Для закрепления пластин бандаж на токарный станок спроектировано и изготовлено специальное приспособление, которое крепится к поперечным салазкам суппорта токарного станка, рисунок 18.

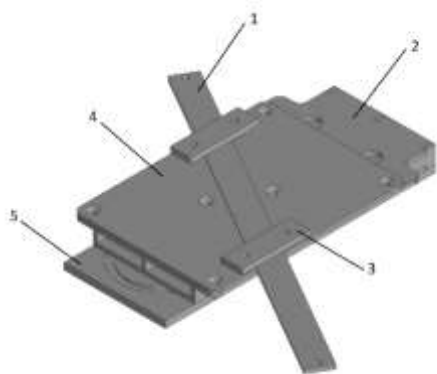


Рисунок 18. Общий вид сборки приспособления для фрезеровки пазов на стальных бандажах. 1 – стальной бандаж, 2- корпус сварной, 3 – прижим, 4 – упор задающий угол, 5 – поперечные салазки суппорта токарного станка.

Процесс фрезеровки на приведен на рисунке 19, процесс имел явный характер удара, из-за чего резец с напаянной твердосплавной пластиной требовал периодической заточки. Шаг профиля составлял 6,54 мм, контроль производился с помощью часового индикатора установленного на станину токарного станка.



Рисунок 19. Процесс фрезеровки пазов.

Полученный профиль (рисунок 20) имел незначительные расхождения по высоте готового профиля  $\pm 0,1$  мм, так как для получения точного профиля требовалось произвести фрезеровку плоскости прилегания стального банджа и корпуса сварного, чтобы получить параллельность между осью вращения режущего инструмента корпуса сварного. Данная операция была отклонена в виду повышенных трудозатрат, получаемый профиль изображен на рисунке 8. Также не на торцевых бандажных пластинах не были изготовлены плавные выходы фрезеруемого профиля, что в дальнейшем проявилось в качестве порезов на эластичном материале при сильном обжатии.

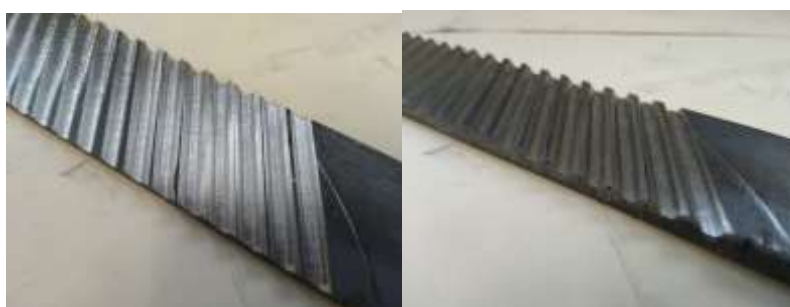


Рисунок 20. Профиль, полученный после фрезеровки.

Следующие операции изготовления бандажных пластин – вальцовка и гибка. Требовалось получить геометрию, позволяющую надежно закрепить пластины на гладком валке с диаметром бочки 180 мм. Эскиз геометрии приведен на рисунке 21.

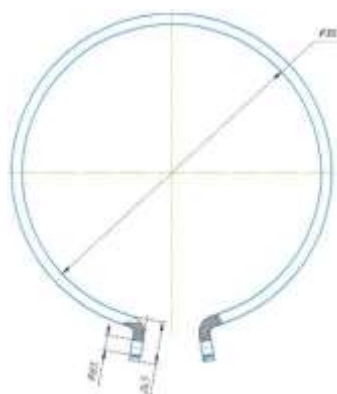


Рисунок 21. Эскиз геометрии пластин после вальцовки и гибки

Вальцовка производилась на трехвалковых вальцах. Недостаток данной конструкции вальцев - это большой недогнутый участок. Фото полученных пластин приведено на рисунке 22.



Рисунок 22. Фото пластин после вальцовки.

Выходом из данного положения стало решение догибки путем стяжки полос уже на гладком валке путем стяжки резьбовыми шпильками. Результатом всех проведенных операций стал собранный валковый узел с закрепленными бандажными пластинами с выфрезерованным профилем и стянутыми шпильками М8, фото валкового узла приведено на рисунке 23.



Рисунок 23. Собранный валковый узел.

Недостатком данного способа изготовления экспериментального профилированного валка является то, что бандажные пластины могут расходиться в процессе прокатки, так как шевронный профиль из-за наклона создает силы в направлении оси вращения валка. Перед каждой прокаткой производился визуальный контроль наличия зазора между пластинами, в случае его обнаружения зазор устранялся.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для получения требуемого профиля на гофрированных пластинах, как говорилось ранее, применяется способ прокатки между профилированным жестким валком и жестким валком с гладкой бочкой, на который натянута лента из эластичного материала.

Эластичные материалы, применяемые в эксперименте, приведены в таблице 1. Фотографии приведены на рисунке 24. Свойства эластичных материалов приведены в приложении А.

Таблица 1. Применяемые эластичные материалы.

№	Материал	Толщина
1	БКНЛ 65-2-0-0 (ГОСТ 23831-79)	3,2
2	2Н-I МБС-С (ГОСТ 7338-90)	10
3	Конвейерная ПВХ лента 3RF72	3
4	Полиуретан листовой СКУ-7Л (ТУ 2226-003-50612932-2005)	10
5	Армированная резина ГОСТ 7338-90	5



Рисунок 24. Эластичные материалы, используемые в эксперименте.

Настройка стана осуществлялась следующим образом, так как мы не знаем точный зазор между верхним и нижним валком устанавливался щуп известной



толщины, дальше верхний валок опускался до того момента пока он не коснется щупа. Затем производилось измерение зазора между подушками, зная эти значения можно точно задавать требуемый зазор между валками.

Процесс прокатки начинался с этапа задания эластичного материала в межвалковое пространство с установленным зазором, затем верхний приводной валок поворачивался на угол от 10 до 15 градусов. После этого, задавалась подготовленная карточка. Из этого следует то, что эластичный материал (ЭМ) на этапе задания в межвалковое пространство был поджат бандажными пластинами, из-за этого на нем при большом обжатии образовались порезы. Данный дефект не проявлялся на участке, где между ЭМ и бандажными пластинами, где находилась карточка. Фото порезов на материале БКНЛ 65-2-0-0 (ГОСТ 23831-79) приведены на рисунке 25. Наличие острого края на торцевой бандажной пластине также проявилось в виде порезов с краев ЭМ при большом обжатии.



Рисунок 25. Повреждения на эластичном материале.

В таблице 2 приведены результаты экспериментов. Материал 2Н-І МБС-С (ГОСТ 7338-90) показал наибольшую вытяжку при зазоре между валками 3 мм.

Таблица 2. Результаты эксперимента.

№	Эластичный материал	Толщина материала	Глубина полученного профиля	Зазор между валками
1	2Н-I МБС-С (ГОСТ 7338-90)	10	0,5	6
2			0,7	5
3			0,9	4
4			1,2	3
5	Полиуретан листовой СКУ-7Л	10	1,3	3
6			1,1	4
7			1	5
8	Резинотканевая резина армированная (ГОСТ 7338-90)	5	1,1	4
9			1,2	3
10			1,8	2
11	БКНЛ 65-2-0-0 (ГОСТ 23831-79)	3,2	1,2	2
12	Конвейерная ПВХ лента 3RF72	2,5	1	2
13	Конвейерная ПВХ лента 3RF72		1,6	1
14	Резинотканевая резина армированная (ГОСТ 7338-90)	5	1,8	2
15	Резинотканевая резина армированная (ГОСТ 7338-90) измерение усилия	5	1,3	4
16			1,6	3
17			1,7	2

Данный тип резины не имеет армирующих элементов в своем составе. Этот недостаток как и ожидалось, проявился в виде появления значительного расширения ЭМ с торцевой стороны так и по ходу прокатки, появилось проскальзывание между нижним валком и ЭМ. На рисунке 26 приведены фотографии процесса прокатки и схематично изображено расширение ЭМ.

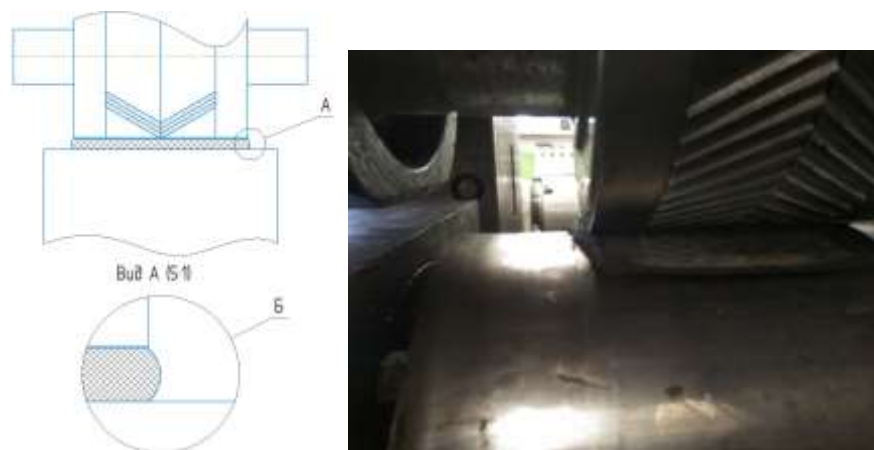


Рисунок 26. Упругое расширение ЭМ в процессе прокатки.

На рисунке 27 можно наблюдать появление замятия карточки материала, автор связывает это с тем, что торцевым бандажным пластинам не хватает площади контакта и коэффициента трения между плоским бандажом и карточкой. Можно предположить, что происходит затягивание нержавеющей листа в зону вытяжки шевронного профиля.



Рисунок 27. Процесс появления замятия.

Аналогично показал себя полиуретан (ПУ), максимальная высота вытянутого профиля составила 1,3 мм. В процессе поджатия ПУ между

валками, при зазоре 3 мм, потребовалось заострить его конец так не происходил захват. Также проявлялся эффект проскальзывания.

Материал БКНЛ 65-2-0-0 (ГОСТ 23831-79) показал максимальную высоту вытянутого профиля 1,2 мм. Этот ЭМ состоит из тканевого каркаса нарезной конструкции и имеет резиновые прослойки между прокладками. Фотография процесса прокатки показана на рисунке 28. В процессе прокатки также проявилось замятие, обжатие в 2 мм было критическим для, данного материала.



Рисунок 28. Процесс прокатки с применением БКНЛ 65-2-0-0.

Прокатка с применением конвейерной ПВХ ленты 3RF72 показала хорошие результаты, максимальная высота профиля составила 1,6 мм, проявилось замятие. Эта конвейерная лента имеет 2 слоя армирования, эскиз поперечного сечения показан на рисунке 29.

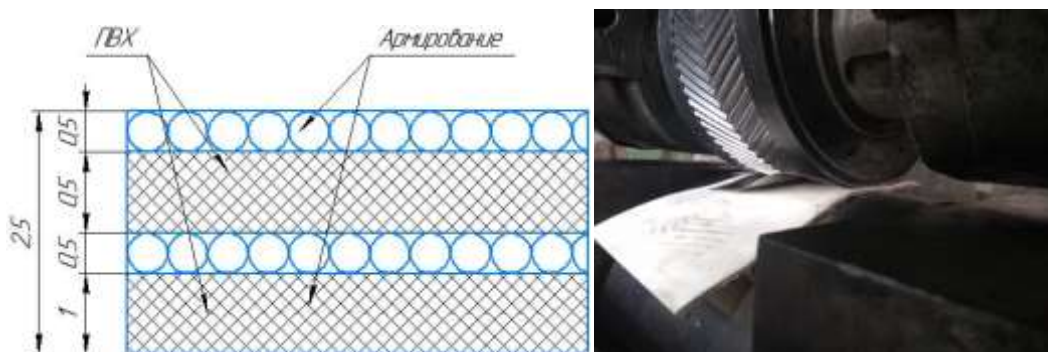


Рисунок 29. Эскиз поперечного сечения ПВХ ленты и процесс прокатки.

Самую большую вытяжку показала резинотканевая резина, этот показатель составил 1,8 мм. Процесс прокатки показан на рисунке 30. На этой резине

также проявился эффект замятия. Для устранения данного эффекта было предпринято решение создать усилие натяжки на заднем конце нержавеющей стали.



Рисунок 30. Процесс прокатки с применением резиноканевой резины.

Следующим шагом проведения эксперимента было измерение усилия под нижним гладким валком. Для измерения использовались тензодатчики мембранного типа с пределом измерения 10 тонн, с предварительной тарировкой.

В таблице 3 приведены максимальные усилия полученные на первой стадии эксперимента – поджатие эластичного материала.

Таблица 3. Усилия при поджатии эластичного материала

№	Толщина материала, мм	Глубина полученного профиля, мм	Зазор между валками, мм	Усилие на левом датчике, Н	Усилие на правом датчике, Н	Суммарное усилие , Н
15	5	1,3	4	120230	99830	22060
16		1,6	3	51166	50629	101790
17		1,7	2	57079	53830	110910

В таблице 4 приведены максимальные усилия в процессе деформации образцов.

Таблица 3. Усилия при поджатии эластичного материала

№	Толщина материала, мм	Глубина полученного профиля, мм	Зазор между валками, мм	Усилие на левом датчике, Н	Усилие на правом датчике, Н	Суммарное усилие , Н
15	5	1,3	4	19856	16624	36480
16		1,6	3	64496	61479	125975
17		1,7	2	77081	75179	152261

По результатам измерений можно установить, что основной вклад в усилие прокатки вносит деформация эластичного материала, а сам процесс деформации образцов вносит 30 %. Полученные данные помогут в дальнейшем при выводе формул определения энергосиловых параметров прокатки и сопоставления с результатами моделирования в пакете LS-Dyna. Фотографии всех полученных гофрированных полос приведены в приложении Б.

#### 4.1. Выводы экспериментальной работы

По результатам эксперимента сделаны следующие выводы:

- 1) Эластичный материал должен иметь армирование в своей структуре чтобы снизить боковое расширение. Применяемых марок ЭМ не достаточно, особое внимание следует уделить на армированный полиуретан с толщиной 5-6 мм.
- 2) Следует произвести дополнительные эксперименты для установления влияния толщины эластичного слоя на процесс деформации.

- 3) Используемая ширина торцевых бандажных лент не достаточна для удержания от проскальзывания гофрируемой полосы к центру профилированного вала. В дальнейшем требуется экспериментально установить эту ширину.
- 4) С целью предотвращения замытия необходимо натяжение гофрируемых полос как с переднего, так и с заднего конца.
- 5) Полученная максимальная вытяжка, удовлетворяет требованиям заказчика, к тому же ширина получаемого профиля 4,31 мм (рисунок 13) является очень узкой.
- 6) Требуется проведение дополнительных экспериментов с измерением момента на приводном зубчатом валке, а также с записью усилий прокатки.

В целом, результаты эксперимента можно признать положительными. Они показали, что данный способ получения гофрированных полос является перспективным, но требуются дополнительные экспериментальные и теоретические работы.

## 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

### 5.1. Определение геометрических параметров очага деформации

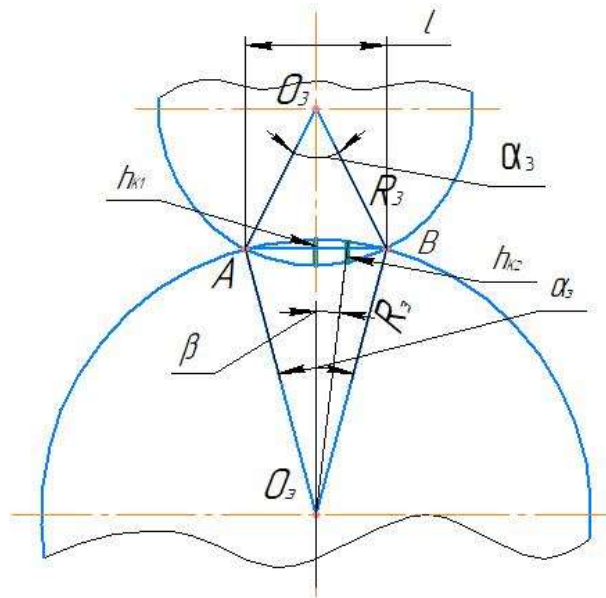


Рисунок 31. К определению геометрических параметров очага деформации при гофрировании ленты.

Согласно схемы очага деформации при гофрировании ленты имеем:

$$h_{k1} = R_э \times \cos \beta_э - R_э \times \cos \frac{\alpha_э}{2} \quad (1)$$

$$h_{k2} = R_3 \times \cos \beta_3 - R_3 \times \cos \frac{\alpha_3}{2} \quad (2)$$

индексы «э» и «3» относятся к эластичному и зубчатому валку, соответственно.

Величина внедрения зубчатого валка в эластичное покрытие равно (см. рисунок 31)

$$h_k = h_{k1} + h_{k2} \quad (3)$$

Подставим выражения (1,2) в (3) имеем:

$$h_{12} = R_э \times \cos \beta_э - R_э \times \cos \frac{\alpha_э}{2} + R_3 \times \cos \beta_3 - R_3 \times \cos \frac{\alpha_3}{2} \quad (4)$$



Из рисунка 31 следует:

$$\frac{l}{2} = R_3 \times \sin \frac{\alpha_3}{2}; \quad \frac{l}{2} = R_9 \times \sin \frac{\alpha_9}{2}$$

или

$$R_3 \times \sin \frac{\alpha_3}{2} = R_9 \times \sin \frac{\alpha_9}{2}$$

Откуда

$$\frac{R_3}{R_9} = \frac{\sin \frac{\alpha_9}{2}}{\sin \frac{\alpha_3}{2}} \quad (5)$$

Разложив в ряд Маклорена функции  $\sin \frac{\alpha_9}{2}$  и  $\sin \frac{\alpha_3}{2}$ , в силу малости углов  $\alpha_9$  и  $\alpha_3$ , получим:

$$\frac{R_3}{R_9} = \frac{\alpha_9}{\alpha_3} \quad (6)$$

Примем

$$K = \frac{R_9}{R_3} = \frac{\alpha_3}{\alpha_9} \quad (7)$$

Преобразуем выражение (4) с учетом соотношений (7)

$$\begin{aligned} h_k &= R_9 \left( \cos \beta_9 - \cos \frac{\alpha_9}{2} \right) + \frac{R_9}{k} \left( \cos(k\beta_9) - \cos \left( \frac{k\alpha_9}{2} \right) \right) = \\ &= R_9 \left( \cos \beta_9 - \cos \frac{\alpha_9}{2} + \frac{1}{k} \cos(k \times \beta_9) - \frac{1}{k} \cos \left( \frac{k\alpha_9}{2} \right) \right) \end{aligned}$$

Окончательно получим:

$$h_k = R_9 \left( \cos \beta_9 - \cos \frac{\alpha_9}{2} + \frac{1}{k} \cos(k \times \beta_9) - \frac{1}{k} \cos \left( \frac{k\alpha_9}{2} \right) \right) \quad (8)$$

Разложим составляющие многочлена в квадратных скобках выражения (8) в ряд Тейлора

$$\cos \beta_3 = 1 - 0,5\beta_3^2 \quad (9)$$

$$\cos \frac{\alpha_3}{2} = \cos(0,5\alpha_3) = 1 - \frac{0,25\alpha_3^2}{2} = 1 - 0,125\alpha_3^2 \quad (10)$$

$$\cos(k\beta_3) = 1 - 0,5k^2\beta_3^2 \quad (11)$$

$$\cos \frac{k\alpha_3}{2} = \cos(0,5k\alpha_3) = 1 - 0,125k^2\alpha_3^2 \quad (12)$$

Подставляя выражение (9-12) в выражение (8), получим

$$\begin{aligned} h_k &= R_3(1 - 0,5\beta_3^2 - 1 + 0,125\alpha_3^2 + \frac{1}{\kappa}(1 - 0,5\kappa^2\beta_3^2) - \frac{1}{\kappa}(1 - 0,125\kappa^2\alpha_3^2)) \\ &= R_3\left(-0,5\beta_3^2 + 0,125\alpha_3^2 + \frac{1}{\kappa} - 0,512\beta_3^2 - \frac{1}{\kappa} + 0,125\kappa\alpha_3^2(1 + \kappa)\right) \\ &= (1 + \kappa)R_3(0,125\alpha_3^2 - 0,5\beta_3^2) \end{aligned}$$

Окончательно

$$h_k = (1 + \kappa)R_3(0,125\alpha_3^2 - 0,5\alpha_3^2) \quad (13)$$

Из рисунка 31 видно, что максимальная величина  $h_k$  при  $\beta_3 = 0$ . Исходя из этого имеем

$$h_k = (1 + \kappa)R_3 \times 0,125\alpha_3^2, \text{ откуда}$$

$$\alpha_3 = \sqrt{\frac{8 \times h_k}{R_3}} \quad (14)$$

$$\alpha_3 = 57,3 \sqrt{\frac{8h_k}{R_3(1 + \kappa)}} \quad (15)$$

Из схемы внедрения зубчатого вала в эластичный валок (рисунок 31) длина зоны деформации  $AB(l)$  будет определяться по формуле

$$l = 2R_3 \times \sin\left(\frac{\alpha_3}{2}\right) \quad (16)$$

Или

$$l = D_3 \times \sin\left(\frac{\alpha_3}{2}\right) \quad (17)$$

Используя выражение (14), получим

$$l = D_3 \times \sin\left(0.5 \sqrt{\frac{8h_k}{R_3(1+k)}}\right) \quad (18)$$

Или

$$l = D_3 \sin\left(1.414 \sqrt{\frac{h_k}{R_3(1+k)}}\right) \quad (19)$$

## 5.2. Методика определения энергосиловых параметров

При гофрировании ленты для спирально-щелевых теплообменников, толщина ленты равна 0,2 мм. При этом поперечная и продольная жесткость ленты незначительна и лента в процессе гофрирования не оказывает влияния на усилие гофрирования.

В процессе гофрирования зубья зубчатого вала внедряются в эластичный материал эластичного вала на величину, необходимую для формирования требуемого профиля. При этом контактные напряжения, возникающие между зубчатым валом должны обеспечить требуемую вытяжку ленты и сформировать профиль, который определяется профилем зубьев.

При разработке методики расчета контактных напряжений и усилия гофрирования целесообразно принять форму зубчатого вала, не имеющую зубьев. В этом случае схема действия контактных напряжений между валами будет согласно рисунку 32.

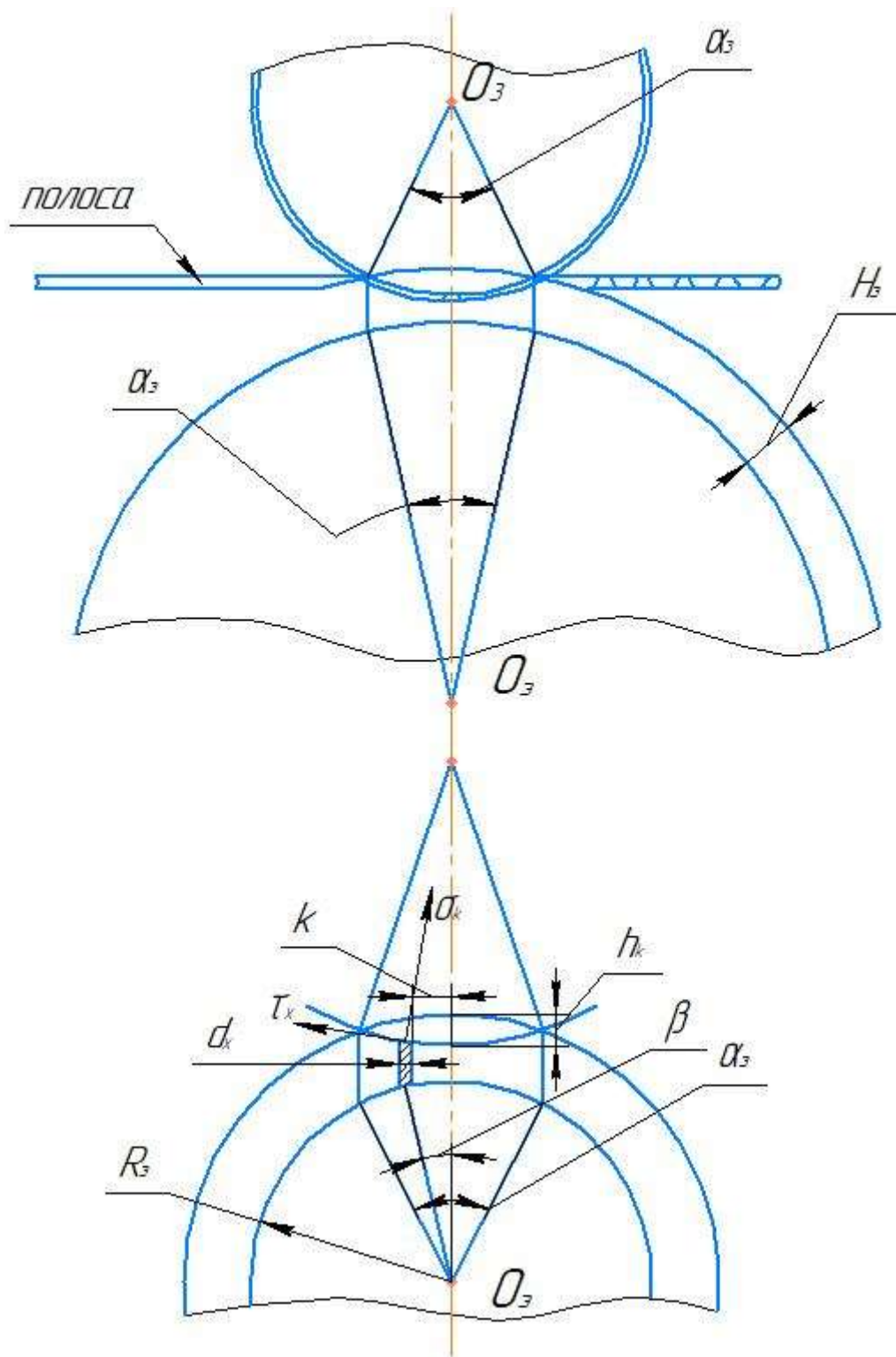


Рисунок 32. Схема действия контактных напряжений.

При определении усилия гофрирования будем учитывать только вертикальную составляющую, которую, исходя из закона распределения нормальных и касательных напряжений по дуге контакта валков можно выразить уравнением

$$P = b_3 \left( \int_{-0,5\alpha_3}^{0,5\alpha_3} \sigma_k \frac{dx}{\cos \beta} \cos \beta - \int_{-0,5\alpha_3}^0 \mu \sigma_k \frac{dx}{\cos \beta} \sin \beta + \int_0^{0,5\alpha_3} \mu \sigma_k \frac{dx}{\cos \beta} \sin \beta \right) \quad (1)$$

где  $b_3$  – ширина зубчатого вала;

$\mu$  – коэффициент трения между валками.

Полагая,  $\beta = \frac{dx}{R_3}$ , и в силу малости второго и третьего члена в выражении (1)

$$P = b_3 \left( \int_{-0,5\alpha_3}^{0,5\alpha_3} \sigma_k R_3 d\beta \right) \quad (2)$$

Положим, что контактное нормальное напряжение  $\sigma_k$  определяется по выражению

$$\sigma_k = E_3 \varepsilon_3 \quad (3)$$

где  $E_3$  – приведенный модуль упругости материала эластичного вала, МПа;

$\varepsilon_3$  – степень деформации эластичного материала.

В формуле (3) степень деформации будет определяться выражением

$$\varepsilon_3 = \frac{h_k}{H_3}$$

Подставляя выражение (3,4) в (2) получим

$$P = b_3 \int_{-0,5\alpha_3}^{0,5\alpha_3} \frac{E_3 h_k}{H_3} R_3 d\beta \quad (5)$$

Используя выражение (13) (см. раздел 5.1), выражение (5) можно записать в виде:

$$\begin{aligned}
P &= b_3 \frac{E_3 R_3}{H_3} \left( \int_{-0,5\alpha_3}^{0,5\alpha_3} (1 + \kappa) R_3 (0,125\alpha_3^2 - 0,5\beta_3^2) d\beta = \right. \\
& b_3 \frac{E_3 R_3}{H_3} ((1 + k) 0,125\alpha_3^2 \int_{-0,5\alpha_3}^{0,5\alpha_3} d\beta - (1 + k) R_3 0,5 \int_{-0,5\alpha_3}^{0,5\alpha_3} \beta_3^2 d\beta = \\
& b_3 \frac{E_3 R_3}{H_3} (1 + k) R_3 0,5 (0,25\alpha_3^2 \int_{-0,5\alpha_3}^{0,5\alpha_3} \beta_3 - \frac{\beta_3^3}{3} \int_{-0,5\alpha_3}^{0,5\alpha_3} = \\
& b_3 \frac{E_3 R_3}{H_3} (1 + k) 0,5 (0,25\alpha_3^2 (0,5\alpha_3 + 0,5\alpha_3) - \frac{1}{3} (0,5^3\alpha_3^3 + 0,5^3\alpha_3^3)) = \\
& b_3 \frac{R_3^2}{H_3} (1 + \kappa) 0,5 \left( 0,25\alpha_3^3 - \frac{0,25}{3} \alpha_3^3 \right) = \\
& b_3 \frac{R_3^2}{H_3} (1 + \kappa) 0,5 \times 0,25\alpha_3^3 (1 - 0,33) = 0,084(1 + \kappa) b_3 \frac{R_3^2}{H_3} \alpha_3^3 E_3 \quad (6)
\end{aligned}$$

Окончательно

$$P = 0,084(1 + k) b_3 \frac{R_3^2}{H_3} \alpha_3^3 E_3 \quad (7)$$

Полагая, что средние контактные напряжения определяются по выражению

$$q_{\text{ср}} = \frac{P}{b_3 \times l} \quad (8)$$

Используя формулы (7 и 19) получим

$$q_{\text{ср}} = 0,042(1 + \kappa) \frac{R_3}{H_3} \times \frac{\alpha_3^3 E_3}{\sin(1,414 \sqrt{\frac{h_k}{R_3(1 + k)}})} \quad (9)$$

## 6. РАЗРАБОТКА КОМПОНОВКИ ЛИНИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ГОФРИРОВАННЫХ ПОЛОС

Бельгийской компанией АСТЕ в 1999 году был зарегистрирован патент [50] «coiled heat exchanger and method for making coiled heat exchanger» (спиральный теплообменник и способ изготовления спирального теплообменника). На рисунке 33 показана схема их получения. Сначала каждый лист, образующий сложенную пару листов, подается из соответствующего подающего устройства 1 и 2. Из подающих устройств 1 и 2 верхний и нижний листы гофрируются в гофрирующих роликах 3. Гофры формируются в определенных зонах листа.

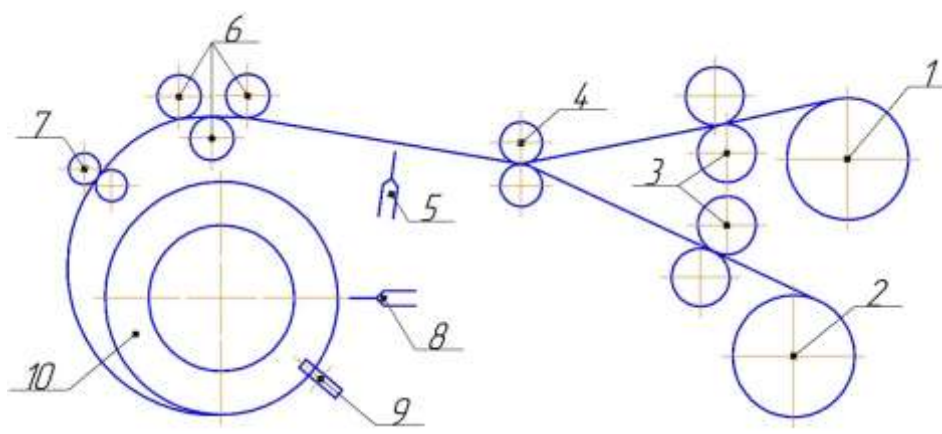


Рисунок 33. Схема производства малогабаритных спиральных теплообменников компанией АСТЕ

От гофрирующих роликов 3 листы пропускаются через ролик 4, который выравнивает листы для шовной сварки вдоль их краев и точечной сварки в точках контакта, если это необходимо, на сварочной станции 5. Полученная соединенная пара листов переходит к изгибающим роликам 6, где подгибаются края, чтобы образовать боковую стенку. После того, как боковая стенка сформирована, пара листов переходит к уплощающим роликам 7, где участки боковой стенки пары листов где они совпадают с газовыми каналами сплющиваются.

От выравнивающих роликов 7 пара листов наматывается вокруг вращающейся оправки 10, где расположена сварочная станция 8, чтобы сваривать соседние стопки рулонов вместе в зонах. Наконец, после вращения оправки 10 наматывает пару листов, чтобы образовать сердцевину теплообменника, режущий инструмент 9 удаляет боковую стенку в соответствующих угловых секторах, чтобы сформировать отверстия для теплоносителя. Вырезание отверстий в боковой стенке после того, как сформирован сердечник теплообменника, по существу устраняет изгиб кромок, определяющих отверстие.

Данная схема является образцовой для создания производства по выпуску теплообменников для микрогазотурбинных энергоустановок. Основным недостатком данного способа является невозможность производства теплообменников в случае сбоя и до его устранения в любом из узлов линии. В рамках ВКР разработана общая компоновка стана для получения гофрированных полос, схема стана представлена на рисунке 34.

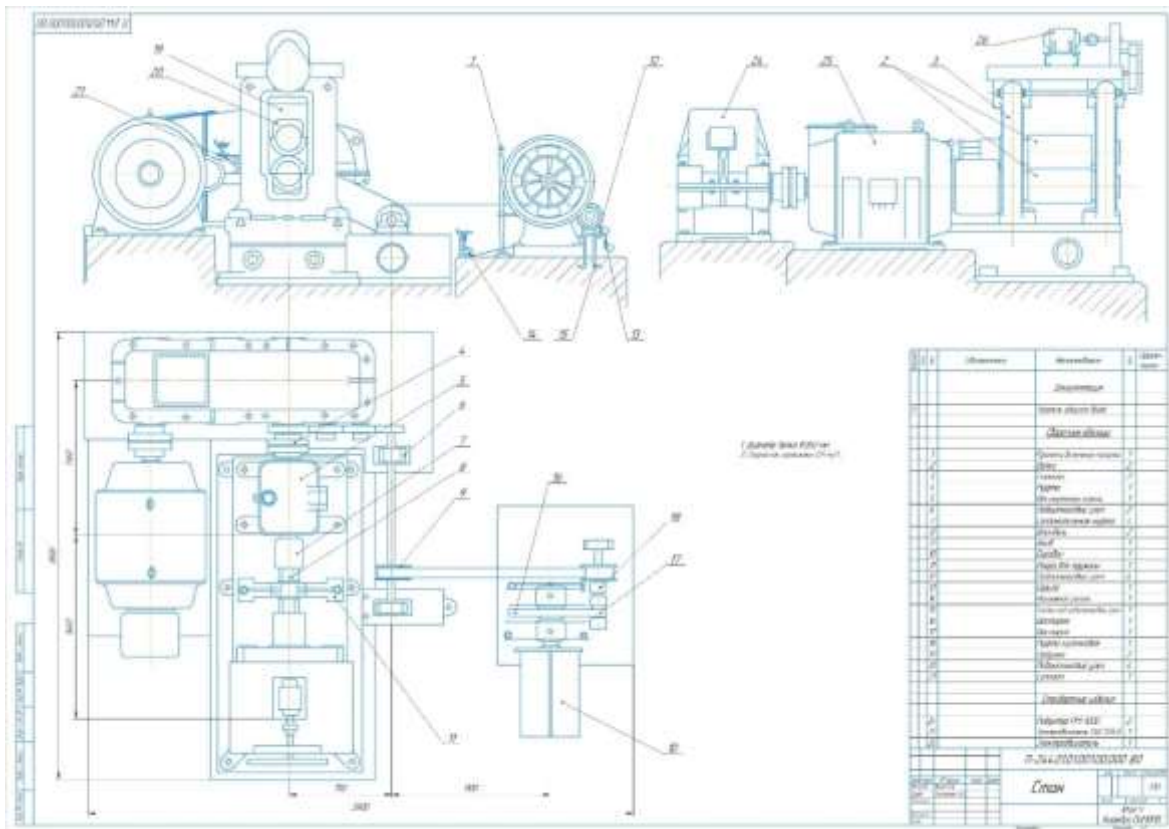


Рисунок 34. Схема стана для гофрирования полос.



На данной схеме не показан узел натяжения эластичного материала и сам ЭМ склеенный в бесконечную ленту, рисунок 35. Узел натяжения устанавливается на станину стана и позволяет регулировать натяжение ЭМ, а также производить регулировку положения оси вращения ролика узла натяжения с целью устранения «убегания» ленты ЭМ. Расчет всех компонентов узла натяжения производился в рамках курсового проекта.



Рисунок 35. Узел натяжения эластичного материала.

Технологический процесс получения гофрированных полос заключается в следующем. Рулон полосы, имеющей толщину 0,2 мм и требуемую ширину 300 мм, устанавливается на разматыватель (не показан на схеме). Передний конец полосы без гофрирования подаётся в рабочую клетку. В рабочей клетке между рабочими валками создаётся требуемое для гофрирования усилие. После обеспечения требуемого усилия гофрирования создаётся натяжение концов полосы и начинается процесс гофрирования.

Процесс гофрирования полосы заканчивается, когда на барабане разматывателя остаётся 3-4 витка полосы. После этого раздвигаются рабочие валки, и полоса сматывается на барабан передней моталки .

Следует отметить, что длины гофрированных полос должны обеспечить получение требуемого наружного диаметра теплообменника.

В рабочей клетки линии изготовления спирального теплообменника гофрирование полос осуществляется в валковом узле, состоящем из зубчатого и эластичного валков.

При прохождении полосы между валками, которые прижаты друг к другу с определённым усилием гофрирования, эластичный валок, выполняющий в данном случае функцию эластичной матрицы, вдавливают полосу в зубчатый валок. Зубчатый валок является жёстким пуансоном.

## 7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОФРИРОВАНИЯ

В рамках проекта была проведена оценочная работа по моделированию процесса гофрирования с помощью пакета МКЭ LS-Dyna, подготовленная задача показана на рисунке 35.

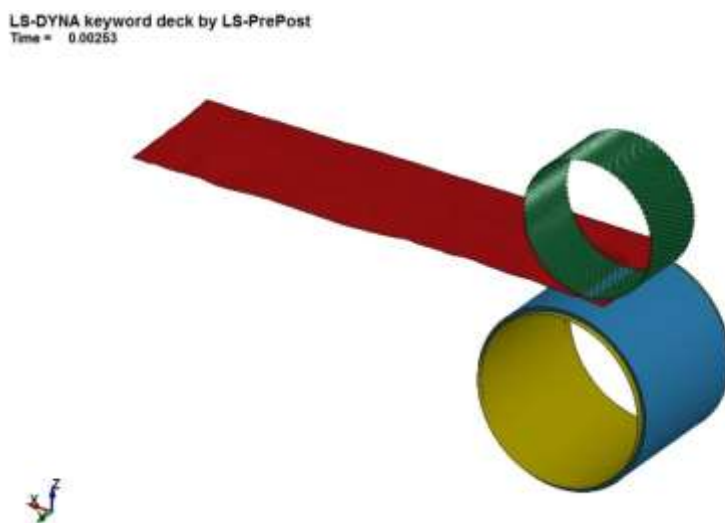


Рисунок 35. Моделирование процесса гофрирования.

Граничные условия:

Размеры листа – толщина 0,2 мм, ширина 180 мм, длина 1000 мм.

Материал листа – 12Х18Н10Т

Свойства ЭМ задавались с помощью модели Муни-Ривлина, коэффициент А равен 2,5 МПа, коэффициент В равен 4,5 МПа. Толщина 10 мм.

Диаметр шевронного вала 180 мм, повторяет диаметр вала примененного в эксперименте, с профилем показанным на рисунке 13. ЭМ был закреплен на плоском валке, диаметр вала составлял 250 мм. На первом этапе моделирования в качестве гофрирующего вала использована половина шеврона, валок имел вид косозубой шестерни.

Моделирование представляло собой два этапа, на первом этапе профильный валок опускался до требуемой высоты, тем самым прижимал и деформировал полосу. На втором этапе профильный валок приводился в движение и происходил процесс прокатки. На рисунке 36 показан график усилия прокатки при погружении в ЭМ на 3 мм.

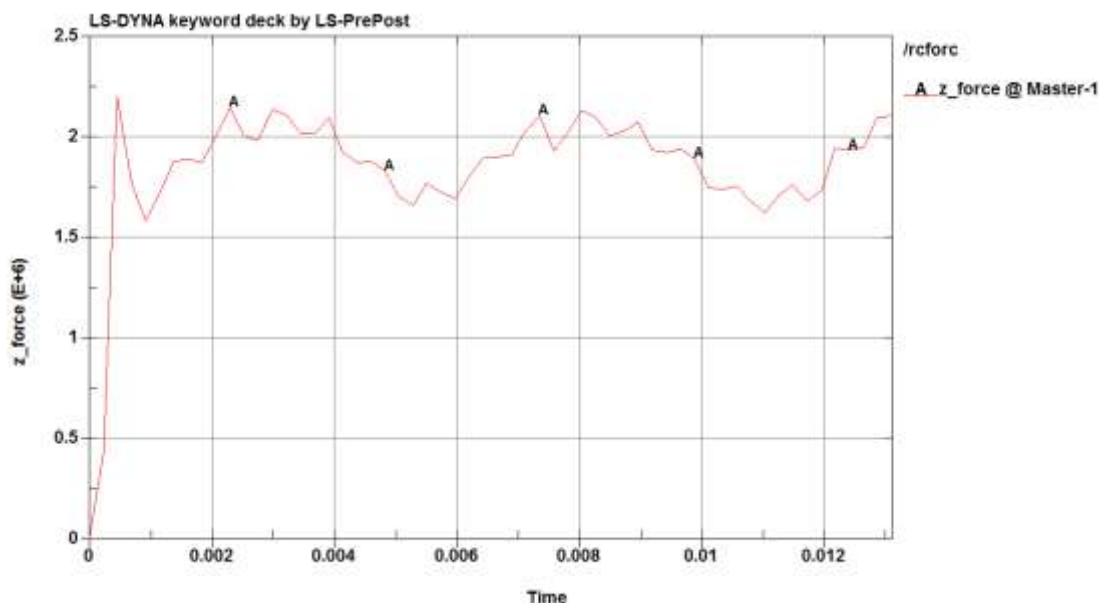


Рисунок 36. График усилия прокатки.

Из графика видно что процесс идет с усилием  $2 \times 10^6$  Н, если сопоставить эти данные с усилием прокатки полученным в ходе выполнения эксперимента, максимальное усилие во время эксперимента составляло  $1,5 \times 10^5$  Н, то можно сделать вывод, что параметры эластичного материала были выбраны неправильно. На рисунке 37 приведен график момента прокатки, в ходе

эксперимента измерение момента не производилось. Моделирование показало, что момент прокатки равен  $12 \times 10^3$  Нм.

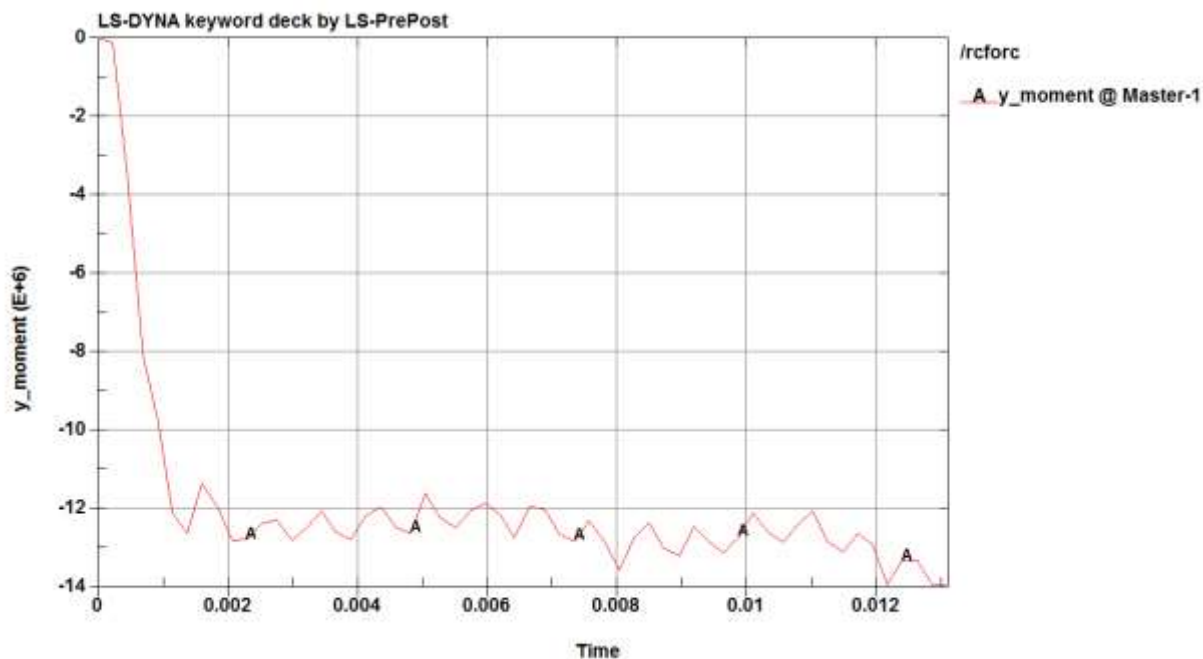


Рисунок 37. График момента прокатки.

На рисунке 38 показано напряженно-деформированное состояние в очаге деформации.

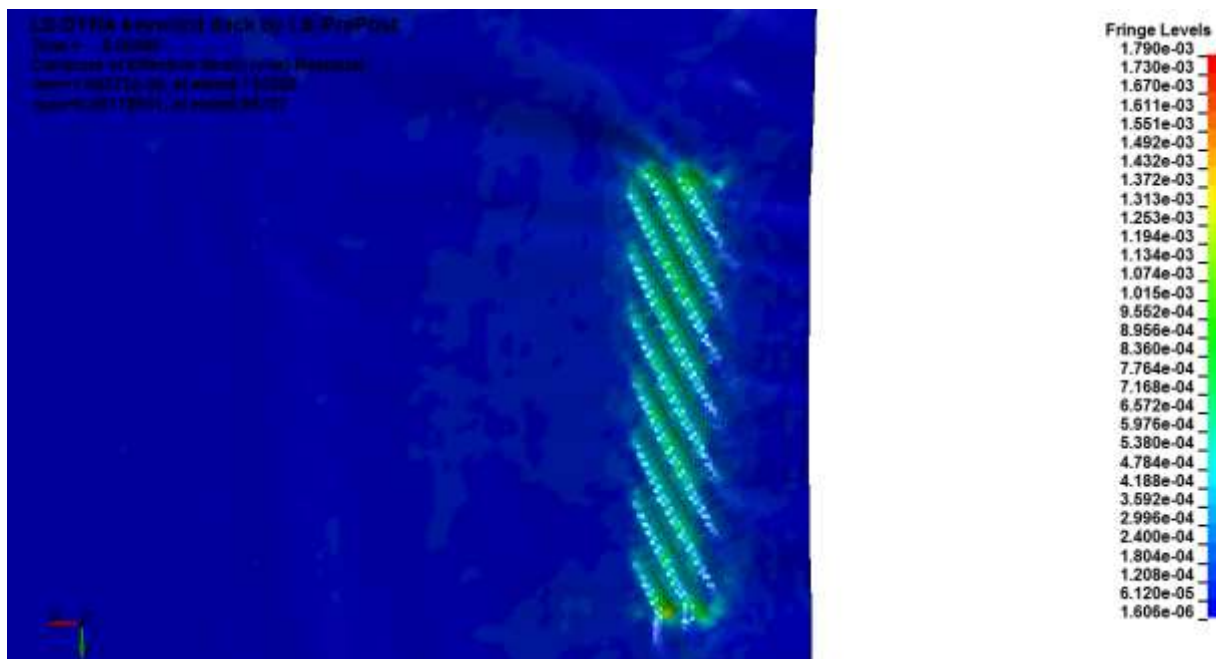


Рисунок 38. Напряженно-деформированное состояние очага деформации.

На рисунке 39 показаны общие деформации, которые включают в себя упруги и пластические.

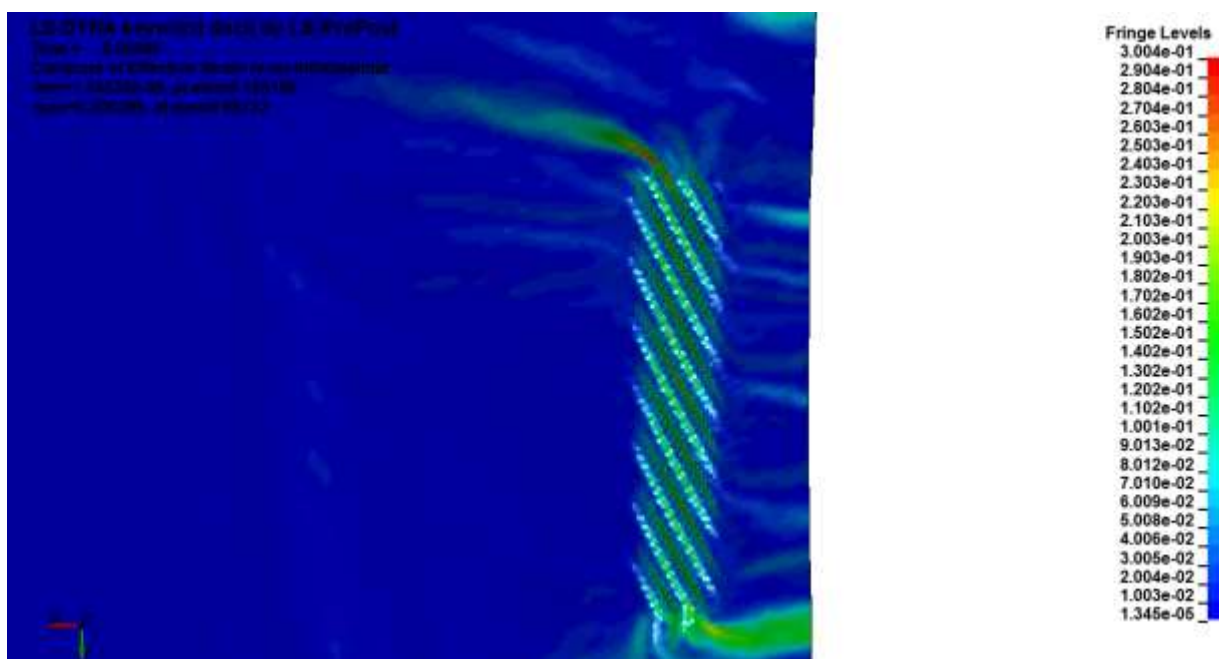


Рисунок 39. Общие деформации процесса гофрирования.

Процесс моделирования получения гофрированных полос не доведен до конца, предстоит произвести моделирование с полным шевроном, произвести испытания ЭМ по методике Муни-Ривлина или поменять модель ЭМ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной ВКР проанализированы основные типы рекуператоров, материалы и технологии используемые при производстве микрогазотурбинных энергоустановок. Сделан обоснованный выбор в пользу спиральных щелевых рекуператоров.

Разработан экономичный способ изготовления профилированного валка путем фрезеровки специального профиля на бандажных пластинах. Этот способ позволяет в дальнейшем проводить эксперименты с различными профилями и углами наклона шевронных каналов.

Произведен оценочный эксперимент по отработке технологии гофрирования полос эластичным материалом, который дал положительные результаты. Применяемые в эксперименте ЭМ показали в каком направлении следует двигаться при выборе эластичной среды. Эксперимент показал на каких технологических проблемах следует заострить внимание, например, следует проработать вопрос натяжки полосы с целью устранения замятия.

Произведен расчет энергосиловых параметров процесса гофрирования, который в дальнейшем поможет в выборе ЭМ, и расчете параметров стана.

Проработана схема стана, позволяющая производить гофрирование полос с применением эластичных материалов.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

БКНЛ 65-2-0-0 (ГОСТ 23831-79) - резиноканевый ремень, предназначен для плоскоремennых передач, транспортеров рядковых жаток, а также для водоподъемников, элеваторов и норий в качестве тягового элемента.

Относительное удлинение по основе при нагрузке 10 % номинальной прочности образца. %. не более	3,5
Прочность связи мри расслоении Н/мм (кгс/см), не менее:	3
Поверхностное электрическое сопротивление ремней для норий, эксплуатируемых на предприятиях по хранению и переработке зерна. Ом, не более	$3 \times 10^8$
Условная прочность при растяжении. МПа, не менее	19,6

2Н-I МБС-С (ГОСТ 7338-90) - вулканизированные резиновые и резиноканевые пластины, предназначенные для изготовления резинотехнических изделий, служащих для уплотнения неподвижных соединений, предотвращения трения между металлическими поверхностями, для восприятия одиночных ударных нагрузок, а также в качестве прокладок, настилов и других неуплотнительных изделий.

Условная прочность при растяжении, МПа, не менее:	6
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее:	250
Относительная остаточная деформация при сжатии на (20 + 5) % в воздухе при 70 °С в течение 24 ч, не более:	0,2
Твердость, международные единицы JРHD или единицы Шора А:	40-55



Пищевая конвейерная лента ПВХ 3RF72 – предназначена для общей транспортировки упакованной и неупакованной продукции пищевой промышленности. Обладает хорошей стойкостью к маслам и жирам растительного и животного происхождения. Может оснащаться гофробортами, поперечными перегородками и направляющими.

Количество прокладок	3
Общая толщина, мм	3
Масса ленты, кг/м <sup>2</sup>	5
Минимальный диаметр вала, мм	120
Диаметр обратного вала, мм	180
Рекомендуемое натяжение ленты, Н/мм	5-8
Рабочая температура, °С	-10...+90
Антистатичность	-

СКУ-7Л – для изготовления деталей, эксплуатирующихся при воздействии абразивных веществ (работа на износ) в хранилищах с зерном и пищевыми продуктами. Благодаря стойкости ко смазкам, нефти и их производным широко применяется в качестве уплотнений нефтяных и масляных сред в подвижных и неподвижных соединениях, а также в штамповочном производстве. Обладает отличной износостойкостью, очень хорошей прочностью при растяжении и стойкостью к разрыву и применяется для изготовления эластичных элементов оборудования в судостроении, машиностроении. Для эксплуатации при положительных температурах. В двух словах: "Для износостойких деталей, работающих при воздействии масла и нефтепродуктов"

Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,24
Твердость по Шору A/D	75-85
Предел прочности при растяжении, не менее, МПа	30
Условное напряжение при 100% удлинении, %	2
Относительное удлинение при разрыве, не менее, %	450
Относительная остаточная деформация после разрыва, не более %	8

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Образец 1



Образец 2



Образец 3



Образец 4



Образец 5



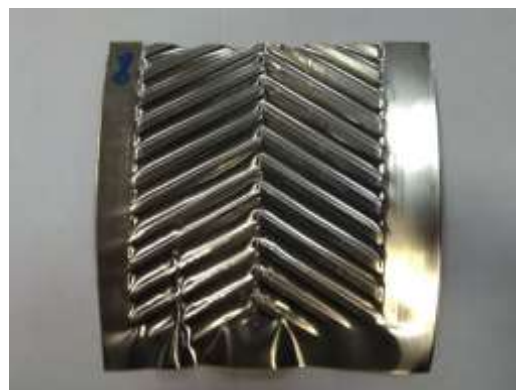
Образец 6



Образец 7



Образец 8



Образец 9



Образец 10



Образец 11



Образец 12



Образец 13



Образец 14



Образец 15



Образец 16



Образец 17





## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bartolini CM, Caresana F, Comodi G, Pelagalli L, Renzi M, Vagni S. Application of artificial neural networks to micro gas turbines. *Energy Convers Manage* 2011;52:781–8
2. Shah RK. Presented at Fifth international conference on enhanced, compact and ultra-compact heat exchangers: science, engineering and technology. Hoboken, NJ, USA; 2005.
3. Pilavachi PA. Mini-and micro-gas turbines for combined heat and power. *Appl Therm Eng* 2002;22:2003–14.
4. Martens A. The energetic feasibility of CHP compared to the separate production of heat and power. *Appl Therm Eng* 1998;18:935–46.
5. Jiayi H, Chuanwen J, Rong X. A review on distributed energy resources and MicroGrid. *Renew Sustain Energy Rev* 2008;12:2472–83.
6. Pepermans G, Driesen J, Haeseldonckx D, Belmans R, Haeseleer W. Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy Policy* 2005;33:787–98.
7. Alanne K, Saari A. Distributed energy generation and sustainable development. *Renew Sustain Energy Rev* 2006;10:539–58.
8. Rivarolo M, Cuneo A, Traverso A, Massardo AF. Design optimisation of smart poly-generation energy districts through a model based approach. *Appl Therm Eng* 2016;99:291–301.
9. Lopes JAP, Hatziargyriou N, Mutale J, Djapic P, Jenkins N. Integrating distributed generation into electric power systems: a review of drivers, challenges and opportunities. *Electr Power Syst Res* 2007;77:1189–203.
10. Aquaro D, Pieve M. High temperature compact heat exchangers: performance of advanced metallic recuperators for power plants; 2005.

11. Canova A, Chicco G, Genon G, Mancarella P. Emission characterization and evaluation of natural gas-fueled cogeneration microturbines and internal combustion engines. *Energy Convers Manage* 2008;49:2900–9.
12. Riccio G, Chiaramonti D. Design and simulation of a small polygeneration plant cofiring biomass and natural gas in a dual combustion micro gas turbine (BIO\_MGT). *Biomass Bioenerg* 2009;33:1520–31.
13. Cadorin M, Pinelli M, Vaccari A, Calabria R, Chiariello F, Massoli P, et al. Analysis of a micro gas turbine fed by natural gas and synthesis gas: MGT test bench and combustor CFD analysis. *J Eng Gas Turbines Power* 2012;134:71401.
14. Traverso A, Massardo AF, Scarpellini R. Externally fired micro-gas turbine: modelling and experimental performance. *Appl Therm Eng* 2006;26:1935–41.
15. Kautz M, Hansen U. The externally-fired gas-turbine (EFGT-Cycle) for decentralized use of biomass. *Appl Energy* 2007;84:795–805.
16. McDonald CF. Low cost recuperator concept for microturbine applications; *Applied Thermal Engineering* 20(5):471-497
17. McDonald CF, Wilson DG. The utilization of recuperated and regenerated engine cycles for high-efficiency gas turbines in the 21st century. *Appl Therm Eng* 1996;16:635–53.
18. McDonald CF. Low-cost compact primary surface recuperator concept for microturbines. *Appl Therm Eng* 2000;20:471–97.
19. McDonald CF. The increasing role of heat exchangers in gas turbine plants;1989.
20. Lagerström G, Xie M. High performance and cost effective recuperator for micro-gas turbines; 2002.



21. Wilson MA, Recknagle KP, Brooks K. Design and development of a low-cost, high temperature silicon carbide microchannel recuperator. ASME Paper No. GT2005-69143; 2005.
22. Treece B, Vessa P, McKeirnan R. Microturbine recuperator manufacturing and operating experience; 2002.
23. Antoine H, Prieels L. The ACTE spiral recuperator for gas turbine engines; 2002.
24. Oswald JI, Dawson DA, Clawley LA. A new durable gas turbine recuperator. ASME paper; 1999: 369.
25. Tsai B, Wang YL. A novel Swiss-Roll recuperator for the microturbine engine. Appl Therm Eng 2009;29:216–23.
26. Kesseli J, Wolf T, Nash J, Freedman S. Micro, industrial, and advanced gas turbines employing recuperators; 2003.
27. Schönenborn H, Ebert E, Simon B, Storm P. Thermomechanical design of a heat exchanger for a recuperative aero engine; 2004.
28. Proeschel RA. Proe 90TM recuperator for microturbine applications; 2002.
29. Utriainen E, Sundén B. A comparison of some heat transfer surfaces for small gas turbine recuperators; 2001.
30. Wang QW, Liang HX, Luo LQ, Wang JW, Huang ZP, Feng ZP, et al. Experimental investigation on heat transfer and pressure drop in a microturbine recuperator with cross-wavy primary surface channels; 2005.
31. Qiuwang W, Hongxia L, Gongnan X, Min Z, Laiqin L, ZhenPing F. Geneticalgorithm optimization for primary surfaces recuperator of microturbine. J Eng Gas Turbines Power 2006;129:436–42.
32. Gang Xiao Recuperators for micro gas turbines: A review / Applied Energy 197 (2017) 83–99

33. Rosfjord T, Tredway W, Chen A, Mulugeta J, Bhatia T. Advanced microturbine systems. United Technologies Corporation; 2008.
34. McDonald CF. Recuperator considerations for future higher efficiency microturbines. *Appl Therm Eng* 2003;23:1463–87.
35. Kim DE, Kim MH, Cha JE, Kim SO. Numerical investigation on thermal-hydraulic performance of new printed circuit heat exchanger model. *Nucl Eng Des* 2008;238:3269–76.
36. Wong M, Owen I, Sutcliffe CJ, Puri A. Convective heat transfer and pressure losses across novel heat sinks fabricated by Selective Laser Melting. *Int J Heat Mass Tranf* 2009;52:281–8.
37. Wong M, Tsopanos S, Sutcliffe CJ, Owen I. Selective laser melting of heat transfer devices. *Rapid Prototyping J* 2007;13:291–7.
38. Wong M, Owen I, Sutcliffe CJ. Pressure loss and heat transfer through heat sinks produced by selective laser melting. *Heat Transfer Eng* 2009;30:1068–76.
39. Tsopanos S, Sutcliffe CJ, Owen I. The manufacture of micro cross-flow heat exchangers by selective laser melting; 2005.
40. Brassell GW, Tennery VJ. Technology assessment of ceramic joining applicable to heat exchangers. TN (USA): Oak Ridge National Lab; 1980.
41. Conservation AS. Ceramic heat recuperators for industrial heat recovery; 1980.
42. Omatete OO, Maziasz PJ, Pint BA, Stinton DP. Assessment of recuperator materials for microturbines. ORNL/TM-2000-304; 2000.
43. Carman BG, Kapat JS, Chow LC, An L, Impact
44. Kelly MM, Pan M, Atre S, Rancourt G, Heyes A, Vick MJ. Ceramic micro channel recuperator fabrication methods for small gas turbine engines; 2012.
45. Halbig M, Jaskowiak M, Kiser J, Zhu D. Evaluation of ceramic matrix composite technology for aircraft turbine engine applications; 2013.

46. Kiser JD, Grady JE, Bhatt RT, Wiesner VL, Zhu D. Overview of CMC (Ceramic Matrix Composite) Research at the NASA Glenn Research Center. NASA Glenn Research Center; 2016.

47. Murthy PLN, Nemeth NN, Brewer DN, Mital S. Probabilistic analysis of a SiC/SiC ceramic matrix composite turbine vane. Compos B Eng 2008;39:694–703.

48. Губин В.И. Производство автомобильных радиаторов. - Горький: Волго-Вят. кн. изд-во, 1979. - 126 с , ил

49. <https://www.youtube.com/watch?v=Pb6rEsuCTVE>

50. Пат. 6,289,978 В1 (США). МКИ F28D 9/04, НКИ 165-165. Заявл. 09.11.1999. Оpubл. 18.09.2001.