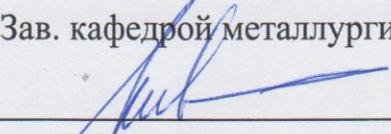


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Нижнетагильский технологический институт  
Кафедра металлургических технологий

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ ПЕРЕД ГЭК

Зав. кафедрой металлургических технологий

  
\_\_\_\_\_ О.И. Шевченко

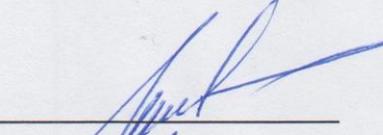
« 14 » 06 2024 г.

### ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРЕССОВАНИЯ  
ПОЛОСОБУЛЬБОВОГО ПРОФИЛЯ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

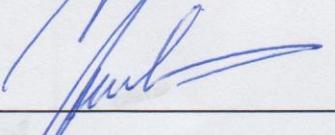
Пояснительная записка  
22.04.02 000 000 302 ПЗ

Руководитель  
д-р техн. наук, доцент

  
\_\_\_\_\_

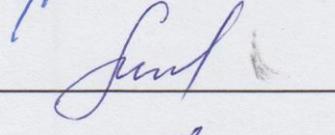
О.И. Шевченко

Консультант  
д-р техн. наук, доцент

  
\_\_\_\_\_

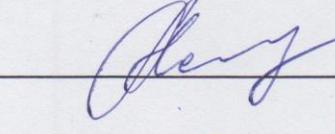
О.И. Шевченко

Консультант  
канд. техн. наук, доцент

  
\_\_\_\_\_

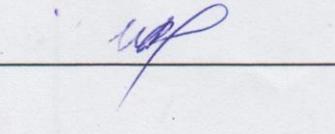
К.Б. Пыхтева

Нормоконтролер

  
\_\_\_\_\_

А.Ю. Лапина

Студент группы  
ТМ-222204-НТ

  
\_\_\_\_\_

И.А. Внуков

Нижний Тагил  
2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Институт Нижнетагильский технологический  
Кафедра металлургических технологий  
Направление 22.04.02 Metallургия  
Образовательная программа Metallургия

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой МТ  
(подпись) О.И. Шевченко  
(Ф.И.О.)

« 22 » 01 2024 г.

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение выпускной квалификационной работы

студента Внуков Илья Анатольевич группы ТМ-222204-НТ  
(фамилия, имя, отчество)

1 Тема ВКР Моделирование и разработка технологии прессования полособульбового профиля из титанового сплава

Утверждена приказом по институту от «21» ноября 2023 г. № 81/05 (НТ)

2 Руководитель Шевченко Олег Игоревич, д.т.н., зав. кафедрой МТ НТИ (филиала) УрФУ  
(Ф.И.О., должность, ученое звание, ученая степень)

3 Исходные данные к работе Государственные и отраслевые стандарты, технологическая документация, а также список литературы, в том числе: Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. Полуфабрикаты из титановых сплавов. М.: Metallургия, 1979. –512 с.; Логинов Ю.Н. Прессование как метод интенсивной деформации металлов и сплавов: учеб. пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 156 с. Логинов Ю.Н., Игнатович Ю. В. Инструмент для прессования металлов. Екатеринбург, 2014. 229 с.

4 Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

1. Общая характеристика производства в цехе 2. Технологические расчеты 3. Моделирование технологического процесса 4. Конструкторская часть 5. Экономическая часть

5 Перечень демонстрационных материалов 1. Чертеж пресс-изделия 2. План прессового участка 3. Пресс гидравлический 31,5 МН 4. Пресс-матрица 5. Схема сборки инструмента прессы 31,5 МН 6. Сетевой график выполнения ВКР

6 Консультанты по проекту (работе) с указанием относящихся к ним разделов проекта

Раздел	Консультант	Подпись, дата	
		задание выдал	задание принял
Графическая часть (спецчасть)	О.И. Шевченко	20.05.2024	20.05.2024
Экономический	К.Б. Пыхтеева	27.05.2024	27.05.2024
Нормоконтроль	А.Ю. Лапина	03.06.2024	03.06.2024

7 Календарный план

Наименование этапов выполнения работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении
Технологическая часть	20.05.2024 – 22.05.2024	выполнено
Разработка технологии	22.05.2024 – 26.05.2024	выполнено
Моделирование	27.05.2024 – 29.05.2024	выполнено
Конструкторская часть	30.05.2024 – 03.06.2024	выполнено
Графическая часть	03.06.2024 – 06.06.2024	выполнено
Экономическая часть	07.06.2024 – 10.06.2024	выполнено
Нормоконтроль	11.06.2024 – 14.06.2024	выполнено

Руководитель \_\_\_\_\_

(подпись)

Шевченко Олег Игоревич

Ф.И.О.

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_

(подпись)

Внуков Илья Анатольевич

Ф.И.О.

8 Выпускная квалификационная работа закончена «14» июня 2024 г.

Пояснительная записка и все материалы просмотрены

Оценка консультантов: \* а) \_\_\_\_\_ б) \_\_\_\_\_

в) \_\_\_\_\_ г) \_\_\_\_\_

Считаю возможным допустить \_\_\_\_\_

Внукова Илью Анатольевича

к защите его выпускной квалификационной работы в экзаменационной комиссии.

Руководитель \_\_\_\_\_

9 Допустить \_\_\_\_\_

Внукова Илью Анатольевича

к защите выпускной квали-

фикационной работы в экзаменационной комиссии (протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_

от « 14 » \_\_\_\_\_ 2024 г.)

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_

(подпись)

Шевченко О.И.

Ф.И.О.

**ПЕРЕЧЕНЬ ЛИСТОВ ГРАФИЧЕСКИХ  
(ДЕМОНСТРАЦИОННЫХ) МАТЕРИАЛОВ**

№ п/п	Наименование	Обозначение	Формат
1	Чертеж пресс-изделия	22.04.02 000 001 302	A1
2	План прессового участка	22.04.02 000 002 302	A1
3	Пресс гидравлический 31,5 МН	22.04.02 000 003 302	A1
4	Пресс-матрица	22.04.02 000 004 302	A1
5	Схема сборки инструмента пресса 31,5 МН	22.04.02 000 005 302	A1
6	Сетевой график выполнения ВКР	22.04.02 000 006 302	A1

## РЕФЕРАТ

Отчет 80 с., 23 рис., 21 источ.

Ключевые слова: прессование, полособульбовый профиль, гидравлический пресс горизонтальный усилием 31,5 МН.

Объект ВКР – прессование профилей.

Цель работы – Проектирование и моделирование технологического процесса производства титанового профиля для судостроения.

Методы и методология проведения работы – Проведение технологических расчётов, моделирование технологического процесса, расчёт на прочность.

Результаты работы и их новизна – полностью спроектированный технологический процесс, готовый к внедрению.

Область применения полученных результатов – судостроительная промышленность.

Итоги внедрения результатов работы – успешное изготовление партии рассматриваемого изделия.

Значимость работы – расширение сортамента ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» и освоение технологического процесса изготовления рассматриваемого изделия.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОИЗВОДСТВА В ЦЕХЕ.....	7
1.1 Технические требования к изделию.....	7
1.2 Характеристики обрабатываемого сплава.....	10
1.3 План и состав производственного участка.....	13
1.4 Виды и причины возникновения брака.....	24
2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ.....	27
2.1 Технологическая схема производства изделия.....	27
2.2 Определение размеров и массы мерной заготовки.....	30
2.3 Определение температурно-скоростных условий прессования.....	33
2.4 Расчет размеров рабочего канала матрицы.....	35
2.5 Расчет длины калибрующего пояска.....	36
2.5 Расчет полного усилия прессования.....	37
2.6 Расчет теплового эффекта деформации.....	40
2.7 Расчет технико-экономических показателей.....	43
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.....	44
4 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ.....	51
4.1 Общая характеристика прессового инструмента.....	51
4.2 Эксплуатация прессового инструмента.....	54
4.3 Расчет деталей прессовой установки на прочность.....	55
4.4 Расчет деталей прессовой наладки на прочность.....	61
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	74
5.1 Сетевой график выполнения ВКР.....	74
5.2 Смета затрат на выполнение ВКР.....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	78
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	79

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в судостроительной промышленности является актуальным применение полособульбовых профилей из титана, используемых в качестве ребер жесткости при создании крупных металлоконструкций. Титановые полособульбы изготавливаются на предприятии ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» в г. Верхняя Салда. Основная часть изделий поставляется для таких предприятий, как ОАО «ПАО «Севмаш», ПАО «Ил» - Авиастар, ОКБ «Новатор», ПАО «ОДК-УМПО».

Основным оборудованием их производства на предприятии является горизонтальный гидравлический пресс усилием 31,5 МН, на котором производят профили с минимальной толщиной стенки от 1,5 мм длиной до 4000 мм, конструкционные толстостенные профили длиной до 4000 мм, толстостенные профили для сварных колец с площадью поперечного сечения до 50 см<sup>2</sup> и минимальной толщиной стенки 10 мм длиной до 4000 мм. Профили изготавливаются из таких сплавов, как, например, ВТ20, ОТ4, ОТ4-1, ПТ-3В, ВТ6.

Целью ВКР является проектирование технологического процесса изготовления титанового полособульба с соблюдением необходимых требований к геометрии и свойствам.

Задачи ВКР:

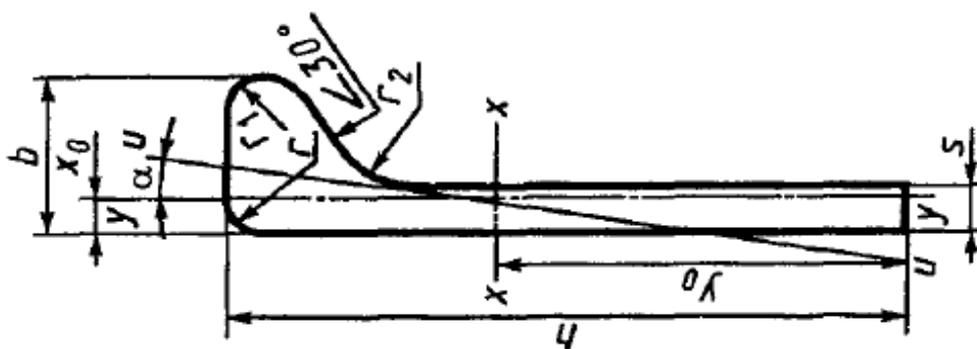
- 1) Рассмотреть технологию изготовления полособульбового профиля из титанового сплава ПТ-3В. Произвести технологические расчеты.
- 2) Провести моделирование спроектированного технологического процесса с помощью программного обеспечения QForm.
- 3) Выполнить конструкционные расчеты на прочность при изготовлении изделия на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 31,5 МН.

# 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОИЗВОДСТВА В ЦЕХЕ

## 1.1 Технические требования к изделию

Прессованные несимметричные полособульбовые профили из титанового сплава из сплава ПТ-3В изготавливают отожженными, выправленными, без газонасыщенного слоя, удаленного травлением. Данный профиль применяется в судостроении в качестве ребра жесткости, что обеспечивается как высокими прочностными характеристиками изделия, так и коррозионной стойкостью сплава ПТ-3В в соленой среде.

Условная схема полособульбового профиля по ГОСТ 21937-76. «Полособульб горячекатаный несимметричный для судостроения» приведена на рисунке 1 [1]:



$h$  – высота полособульба;  $b$  – ширина полки;  $s$  – толщина стенки;  $r$  – радиус закругления левой верхней части полки;  $r_1$  – радиус закругления правой верхней части полки;  $r_2$  – радиус закругления нижней части полки

Рисунок – 1. Условная схема полособульбового профиля

Номинальные геометрические размеры и предельные отклонения геометрических размеров профилей должны соответствовать ТУ 1825-569-07510017-2005 «Профили прессованные несимметричные полособульбовые из титанового сплава марки ПТ-3В».

Данные размеры представлены в таблице 1 [1].

Таблица 1 – Номинальные размеры и предельные отклонения размеров профилей

$h$ , мм	$b$ , мм	$s$ , мм	$r, r_1, r_2$ , мм	Предельные отклонения, мм		
				по ширине полки	по толщине стенки	по высоте профиля
120	30	6,5	5,0	+1,0	+0,9 -0,5	$\pm 1,5$

Профили изготавливают длиной не более 4000 мм. В каждой партии профили изготавливают одной мерной длины или длиной, кратной мерной (КД), или немерной (НМ) в пределах от 1000 до 4000 мм. При изготовлении профилей немерной длины допускается указывать минимальную длину профилей. Профили кратной мерной длины изготавливают с учетом припуска на каждый рез +15 мм.

Профили обрезают под прямым углом. Угол скручивания вокруг продольной оси на один метр длины любого участка профиля не должен превышать 2°. Допустимая продольная кривизна относительно любой плоскости на любом участке профиля длиной один метр не должна превышать 2,5 мм.

Поверхность профилей должна быть без трещин, расслоений, металлических и неметаллических включений. На поверхности профилей допускаются вмятины, забоины, риски, задиры. При этом глубина залегания дефектов не должна превышать 0,5 мм. Наличие следов технологической смазки и пятен от продуктов травления, водяных подтеков и белого налета браковочным признаком не является. Глубину залегания дефектов определяют контрольной абразивной зачисткой. На поверхности профилей допускаются следы зачистки, если они не выводят размеры профилей за минусовые предельные отклонения.

Наличие следов технологической смазки и пятен от продуктов травления, водяных подтеков и белого налета браковочным признаком не является.

Острые продольные выступы металла в местах затекания металла в разъемы матрицы должны быть притуплены абразивной зачисткой. Допускаются остатки притупленных продольных выступов в виде местных утолщений высотой не более 0,5 мм.

Механические и технологические свойства профилей, определяемые на образцах, вырезанных из профилей в состоянии поставки в продольном направлении, должны соответствовать требованиям таблицы 2 [2]. При этом допускается изготовление профилей в количестве 10% от партии с ударной вязкостью не менее 0,66 МДж/м<sup>2</sup>.

Таблица 2 – Требуемые механические и технологические свойства профилей сплава ПТ-3В

Наименование характеристики	Значение характеристики
Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа	$\geq 638$
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	$\geq 588$
Относительное удлинение $\delta_5$ , %	$\geq 10$
Относительное сужение $\Psi$ , %	для круглых образцов – $\geq 20$ ;
Ударная вязкость КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	$\geq 0,69$
Угол изгиба технологической пробы, °	$\leq 90$ – без образования трещин; $\leq 120$ – без излома пробы

Требования к шероховатости поверхности отдельных участков одной поверхности могут быть различными. Параметры шероховатости выбираются из приведенной номенклатуры: среднеарифметическое отклонение профиля  $R_a$ , наибольшая высота профиля  $R_z$ , полная высота профиля  $R_{max}$ , средний шаг неровностей  $S_m$ , средний шаг местных выступов профиля  $S$ , относительная опорная длина профиля  $t_p$ , где  $p$  – значение уровня сечения профиля. Параметр  $R_z$  является предпочтительным и равен 40 мкм для некалиброванных профилей в соответствии с ГОСТ-2789-73 «Шероховатость поверхности» [3].

## 1.2 Характеристики обрабатываемого сплава

При производстве полособульбовых профилей марки ПТ14-8 используется сплав ПТ-3В. Данный сплав является титановым деформируемым сплавом на основе алюминия и ванадия и относится к структурной группе псевдо- $\alpha$ -сплавов.

Плотность сплава – 4450 кг/м<sup>3</sup>. Температура полиморфного превращения сплава – 970°C. Химический состав материала профилей из сплава ПТ-3В должен соответствовать ГОСТ 19807-91 «Титан и сплавы титановые деформируемые» [4] за исключением водорода. Содержание водорода в металле профилей не должно превышать 0,008% массовых долей [2]. Так как данный титановый сплав принадлежит к классу псевдо- $\alpha$ -сплавов, он обладает сравнительно высокой прочностью, а также достаточно хорошей пластичностью при высоких температурах для получения разного вида титановых полуфабрикатов. Помимо этого, отличительным качеством сплава ПТ-3В является коррозионная стойкость в соленой среде, что позволяет ему найти применение в судостроении.

Химический состав материала профилей из сплава ПТ-3В представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Химический состав сплава ПТ-3В в %

Химический элемент	Содержание по НД %
<i>Al</i>	3,5 – 5,0
<i>V</i>	1,2 – 2,5
<i>Zr</i>	не более 0,30
<i>Si</i>	не более 0,12
<i>Fe</i>	не более 0,25
<i>O</i>	не более 0,15
<i>N</i>	не более 0,04

Химический элемент	Содержание по НД %
<i>C</i>	не более 0,10
<i>H</i>	не более 0,008
<i>Cu</i>	—
<i>Ni</i>	не более 0,08
<i>Ni + Cu</i>	не более 0,10
<i>Cr + Mn</i>	не более 0,15
Сумма прочих примесей	не более 0,30

Кривые упрочнения для сплава ПТ-3В изображены на рисунке 2.

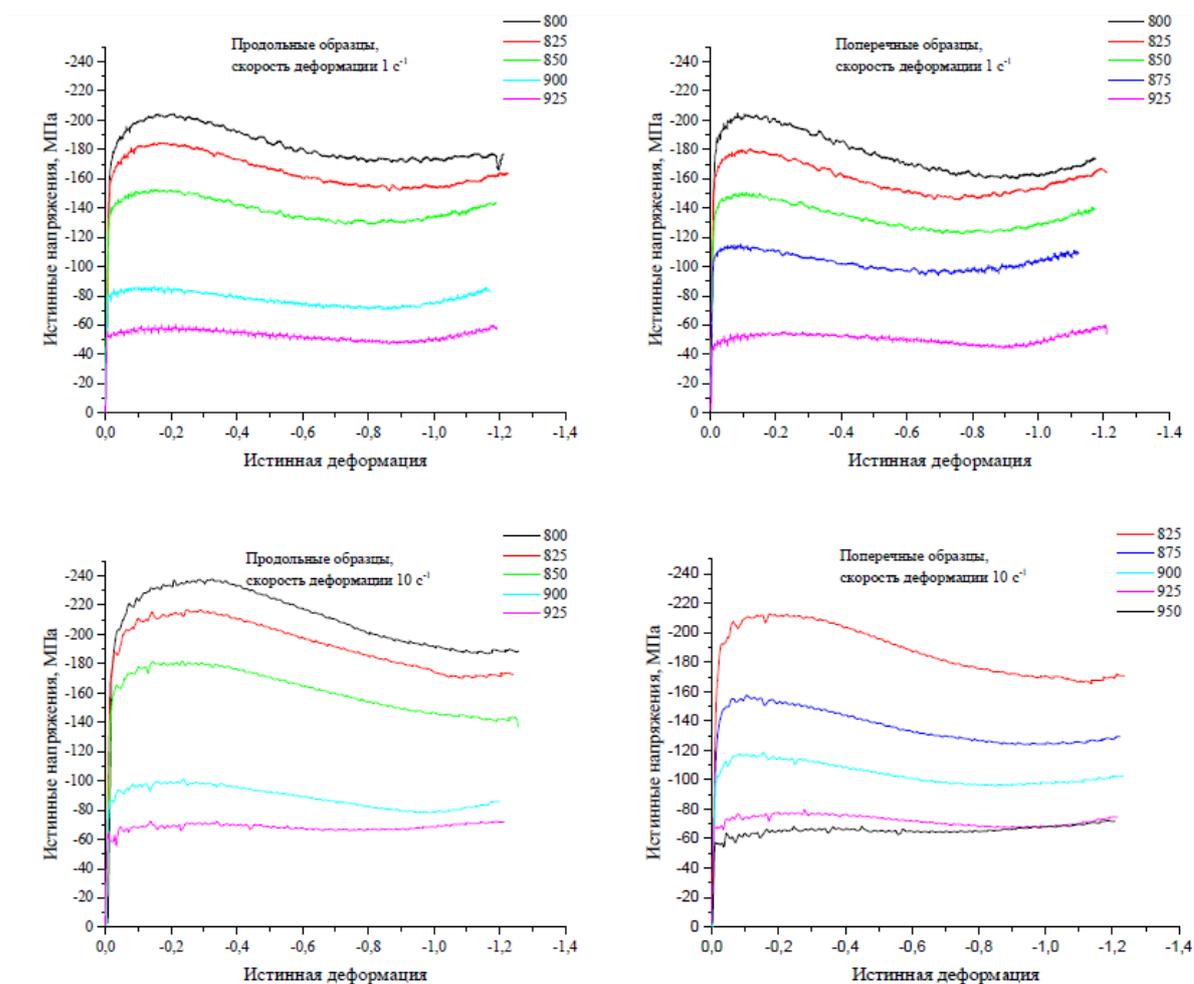


Рисунок – 2. Кривые упрочнения для сплава ПТ-3В

Рассмотрим влияние основных легирующих элементов сплава на его свойства. Алюминий является  $\alpha$ -стабилизатором и в области концентраций примерно до 7% приводит к росту прочности, в частности при концентрации выше 4%. Это объясняется начинающимся упорядочением в  $\alpha$ -фазе. [5] Легирование титана алюминием ограничивает двойникование и резко увеличивает неоднородность деформации скольжения. Среди других преимуществ алюминия можно выделить его распространенность в природе, а также низкий удельный вес.

Среди недостатков алюминия можно выделить уменьшение технологической пластичности и ударной вязкости. Особенно резкое падение пластичности наблюдается в сплавах при содержании выше 7,0% из-за образования интерметаллида  $Ti_3Al$ . Исходя из этого положения, состав сплава выбирается так, чтобы избежать его возникновения за счет добавления  $\beta$ -стабилизаторов.  $\beta$ -стабилизаторы понижают температуру полиморфного превращения, растворяются в основном в  $\beta$ -фазе и упрочняют ее за счет твердорастворного механизма.

Ванадий является одним из наиболее распространенных легирующих элементов в титановых сплавах благодаря своей уникальной способности повышать как прочность, так и пластичность сплава. Он является  $\beta$ -стабилизатором и измельчает структуру сплава, особенно величину  $\alpha$ -зерна и  $\alpha$ -пластин. Следствием этого является увеличение равномерности тонкого скольжения и сохранение, несмотря на повышение прочности, высокого уровня пластичности. Большая растворимость ванадия в  $\alpha$ -титане (до 3%) позволяет создавать сплавы, которые сочетают в себе преимущества однофазных альфа-сплавов (хорошую свариваемость) и двухфазных сплавов (способность к упрочняющей термической обработке). Другим преимуществом легирования ванадием является отсутствие в системе Ti-V эвтектоидных реакций и металлидных фаз. Этим почти исключается возникновение хрупкости при любых ошибках в проведении технологических процессов, связанных с нагревом.

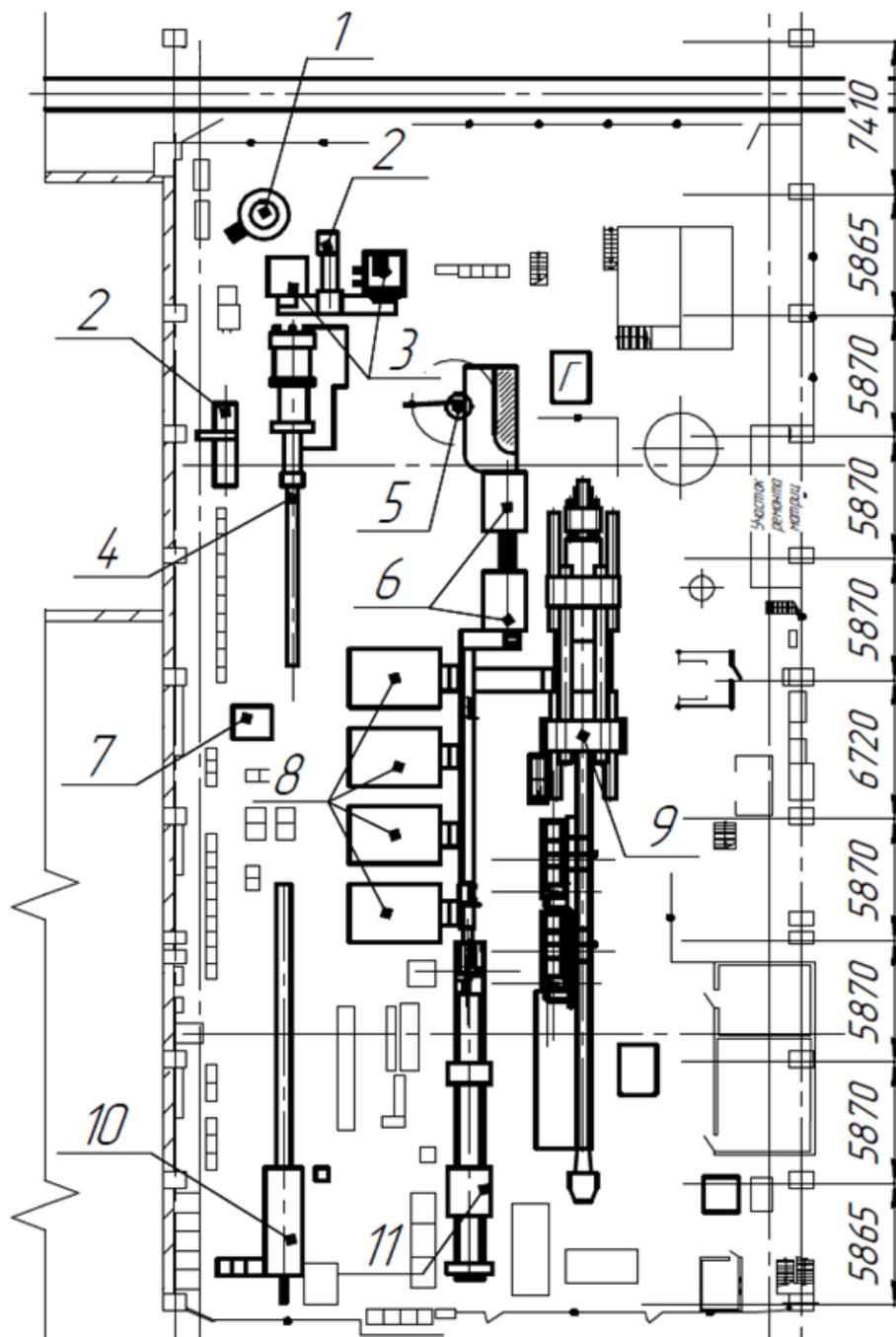
### 1.3 План и состав производственного участка

Процесс прессования и механическая обработка профилей проводятся в производственном отделе, расположенном в цехе №3 предприятия ПАО «Корпорация ВСМПО – АВИСМА», который включает в себя прессовый участок с гидравлическими прессами усилием 31,5 МН и 10 МН, печами и индукторами для их обслуживания, правильно-растяжными машинами усилием 2,5 МН и 0,5 МН, масляным прессом для правки труб, а также участок напыления и доработки матриц и участки щелочного травления и дробеметной установкой.

В отделе также расположен участок механической обработки со станками 1М63, 1Н65, РТ117, ленточнопильными станками «КАСТО». Рядом с участками сдачи продукции данного отдела располагается абразивно-отрезной станок модели 8252, участок ультразвукового контроля, масляный пресс для правки толстостенных профилей. Рядом с участком правки прокатного отдела располагается участок калибровки тонкостенных профилей с прессом пульсирующей нагрузки ППН-315 усилием 3,1 МН.

На прессовом участке заготовка под прессование поступает из индукционной установки в электропечь сопротивления. Из ЭПС заготовка по наклонной поверхности обкатывается по стеклосмазке и податчиком подается на ось прессы усилием 31,5 МН.

План прессового участка цеха №3 представлен на рисунке 3.



1 – печь для нагрева контейнеров АВ-77, 2 – установка индукционная пресса 1000 тс КБ-526, 3 – электропечь сопротивления камерная пресса 1000 тс АВ-79, 4 – пресс горизонтальный гидравлический 1000 тс, 5 – кран консольно-поворотный, 6 – установка индукционная пресса 3150 тс ОКБ-755, 7 – пресс вертикальный-гидравлический PVE 16OS, 8 – электропечь сопротивления камерная пресса 3150 тс АА-49, 9 – пресс экструзионный 3150 тс, 10 – машина растяжная 50 тс, 11 – машина растяжная 250 тс

Рисунок – 3. Прессовый участок цеха № 3

Основным деформирующим оборудованием для изготовления полособульбового профиля ПТ14-8 из сплава ПТ-3В является горизонтальный гидравлический пресс усилием 31,5 МН. Техническая характеристика данного пресса приведена в таблице 4 [6].

Таблица 4 – Техническая характеристика пресса усилием 31,5 МН

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальное усилие прессующей группы, МН	26,46
Усилие двух возвратных цилиндров прессующей группы, МН	2,844
Максимальная скорость холостого хода главной прессующей группы, мм/с	не более 300
Наибольшая скорость рабочего хода прессующей группы, мм/с	300
Скорость обратного хода прессующей группы, мм/с	140
Ход прессующей группы, мм	2120
Длина контейнера, мм	1000
Наибольший внутренний диаметр втулки контейнера, мм	280
Ход контейнера, мм	1150
Усилие цилиндра контейнера, МН: прижим отжим	2,157; 3,874
Скорость хода контейнера, мм/с: прижим отжим	100; 140
Усилие цилиндра инструментальной доски, кН	138,8

Наименование параметра	Значение параметра
Скорость перемещения инструментальной доски, мм/с	200
Усилие цилиндра ходоограничителя, кН	29,4
Скорость подъема ходоограничителя, мм/с	200
Ход ходоограничителя, мм	540
Давление рабочей жидкости (высокое), кПа	31381,3
Давление рабочей жидкости (низкое), кПа	1190,5
Усилие цилиндра податчика заготовки, кН: к прессу от прессы	61,8; 61,8
Скорость движения податчика заготовки, мм/с: к прессу от прессы	500; 500
Ход механизма податчика заготовки, мм	2110
Диаметр заготовки (номинальный), мм: наибольший наименьший	275; 160
Наибольшая длина заготовки, мм	770
Скорость рабочей подачи диска пилы, мм/с	1-2
Диаметр диска пилы, мм	1100
Скорость вращения диска пилы, м/с	75,5
Частота вращения диска, мин <sup>-1</sup>	1300
Мощность электродвигателя пилы, кВт	75
Диаметры втулок контейнеров, мм	170, 200, 230, 280

Ход главного плунжера прошивной системы равен 3180 мм, что на 1060 мм больше хода главного плунжера пресса, поэтому усилие, развиваемое прошивной системой, может быть использовано как дополнение к усилию, развиваемому главным плунжером при прессовании заготовки профилей и прутков. Для внутреннего охлаждения иглы шток прошивного устройства сделан пустотелым. В нем смонтирован трубопровод, подводящий воду во внутреннюю полость иглы; внутреннее охлаждение возможно только для иглы диаметра 70 мм и выше. Меньшие иглы охлаждают вручную и делают сплошными. Контейнер пресса – подвижный с ходом, равным его длине. Это позволяет в случае необходимости проводить прессование обратным методом.

Пресс-остаток обрезают пилой, в этом случае изделие из матрицы выталкивается концом пресс-остатка при возврате контейнера в направлении к матричной доске. Привод вращения пилы от электромотора 14 кВт, 0-880 об/мин, подача гидравлическая бесступенчатая в пределах 0,35 мм/с. Прессы усилием до 31,5 МН изготавливают с поперечно-передвижной матричной доской и с вращающимся устройством, а также с выдвигной кареткой матрицедержателя. Выдвигная каретка матрицедержателя делает пресс более универсальным и расширяет технологические возможности.

Еще одна особенность конструкции пресса усилием 31,5 МН – механизм передачи пресс-остатка и пресс-шайбы на разделку. Для отделения пресс-остатка с пресс-шайбой от изделия могут быть применены и гильотинные ножницы; станина ножниц закрепляется на передней траверсе пресса и колоннах. Нож отделяет пресс-остаток с пресс-шайбой от изделий, которые падают на приемную призму. Опуская, призма устанавливается на механизм передачи пресс-шайбы с пресс-остатком к ножницам для их разделения.

Для механизации процесса прохождения контрольной пресс-шайбы с целью очистки контейнера на прессе установлен специальный механизм, состоящий из цилиндра, захватывающего и поднимающего пресс-шайбу и опускающего ее на ось прессования. Все основные гидроприводы пресса питаются от насосно-аккумуляторной станции с максимальным давлением 320

ат. Вспомогательные механизмы имеют самостоятельный привод от маслонасосной установки. Для управления гидроцилиндрами, питающихся от насосно-аккумуляторной станции, служат клапанные дистрибуторы (водораспределители), которые управляют дистанционно посредством электрогидравлической системы. Пресс может работать в пооперационном или полуавтоматическом режиме.

Дистанционное управление с пультов и вынесение гидравлических распределителей в подвальное помещение облегчает работу на прессе, а механизация вспомогательных операций позволяет сократить число обслуживающих пресс операторов.

Процесс прессования включает в себя следующие операции:

- нанесение смазки на поверхность заготовки и на инструмент,
- нагрев заготовок,
- прессование,
- отделение пресс-остатка,
- измерение геометрических размеров профиля.

При прессовании тонкостенных профилей из титановых сплавов в качестве защиты от окисления и для смазки боковой поверхности перед нагревом производится обмазка заготовок эмульсией ЭВТ-24. Применение смазок позволяет исключить контакт поверхности прессуемого металла с поверхностью прессового инструмента и уменьшить усилие прессования и нагрузку на инструмент. Рабочая поверхность матрицы должна быть покрыта защитным слоем диоксида циркония, исключаяющим контакт прессуемого металла с металлической поверхностью матрицы. Нанесение смазки на заготовку производит нагревательщик металла. На прессе усилием 31,5 МН заготовки, при помощи консольной кран-балки грузоподъемностью 0,5 т, ставятся торцом на стол. Поверхность заготовок перед нанесением защитно-смазочного покрытия должна быть очищена от грязи, пыли и жира. Обезжиривание производится салфеткой, смоченной раствором стирального порошка. Смазка наносится только на боковую поверхность при помощи

губки. Сушка обмазанных заготовок производится до полного высыхания покрытия на воздухе. Сплошность покрытия контролируется визуально. Дефекты устраняются дополнительным нанесением смазки. Смазка поверхности втулки контейнера перед каждой прессовкой производится вручную при помощи деревянного стержня, обмотанного с одного конца ветошью. Для смазки втулки применяется смесь цилиндрического масла и карандашного графита.

Матрицы перед прессованием должны быть просушены в сушильном шкафу при температуре 200°C, время просушки должно быть не менее 60 минут. Перед прессованием профилей втулка контейнера должна быть нагрета до температуры от 400°C до 420°C. Прессовщик производит сборку матричного узла согласно утвержденным чертежам на сборку инструмента и, при помощи консольного крана, устанавливает матричный узел в гнездо инструментальной доски. При установке производится контроль сохранности напыленного слоя и соответствие матрицы прессуемому изделию. При помощи пульта управления прессовщик устанавливает инструментальную доску в рабочее положение и производит очистку поверхности втулки контейнера от налипков металла и смазки с помощью шайбы для чистки втулки прессы.

Прессовщик вручную устанавливает матрицу в корпус матрицы (кольцо), и поворачивая матрицу совмещает фигуру очка матрицы с фигурой подставки. При помощи пульта управления прессовщик устанавливает инструментальную доску с матричным узлом на ось прессования, подводит контейнер к инструментальной доске и прижимает его к матрице. При помощи клещей прессовщик устанавливает на подагчик заготовки пресс-шайбу и нагретую заготовку. Включается механизм подагчика, и заготовка с пресс-шайбой подается на ось прессования (контейнера). Прессовщик включает гидравлическую систему холостого хода прессы и пресс-штемпелем задает заготовку с пресс-шайбой в контейнер. Время подачи заготовки из печи в контейнер должно быть не более 1 минуты. Затем прессовщик включает

механизм подачника заготовок и опускает его в исходное положение, после чего включает гидравлическую систему рабочего хода пресса с пульта управления и производит прессование заготовки.

После прессования, до отделения пресс-остатка, в случае получения скручивания на профилях, прессовщик со стороны выходного желоба пресса при помощи специальных ключей вручную проводит раскручивание отпрессованных профилей. По окончании прессования прессовщик 6-го разряда, при помощи пульта управления, отводит контейнер с профилем в заднее положение, на требуемое для удаления пресс-остатка расстояние. При этом части матрицы выпадают из корпуса и удаляются прессовщиком в место сбора матриц. При помощи дисковой пилы прессовщик производит отделение пресс-остатка. При отделении пресс-остатка для исключения разлета расплавленного металла (искр) используют защитную металлическую шторку. После прессования полученное пресс-изделие перемещается на участок травления с помощью электромостового крана.

Абразивно-отрезной станок модели 8252 используется для обрезки концов полученного пресс-изделия. Техническая характеристика абразивно-отрезного станка приведена в таблице 5 [7].

Таблица 5 – Технические характеристики абразивно-отрезного станка 8252

Наименование параметра	Значение
Габаритные размеры станка, мм: длина ширина высота с открытым кожухом	8000; 2680; 2020
Масса станка, кг	3400
Мощность электродвигателя главного привода, кВт	30
Скорость отвода абразивного круга в исходное положение, мм/мин	2400

Наименование параметра	Значение
Привод главного двигателя	электромеханический нерегулируемый
Регулирование скорости подачи абразивного круга	бесступенчатое
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	1460
Величина хода шпиндельной заготовки, мм	190
Скорость подачи абразивного круга, мм/мин: минимальная; максимальная	100; 1050
Диаметр абразивно-отрезного круга, мм	500
Толщина абразивно-отрезного круга, мм	5
Посадочный диаметр под абразивный круг, мм	32
Начальная скорость резания, м/с	48
Наибольшие размеры отрезаемой заготовки, мм ширина высота	150; 80
Длина отрезаемой по упору заготовки, мм минимальная максимальная	30; 1000

В качестве режущего инструмента на абразивно-отрезном станке модели 8252 применяются абразивно-отрезные круги размерами 500×5×32 мм. Материал круга – карбид кремния.

Термическая обработка профилей производится в ЭПС с передвижной камерой. Плиты для укладки отжигаемых изделий изготавливаются из стали 50Х24Н12СЛ. Техническая характеристика ЭПС приведена в таблице 6 [8].

Таблица 6 – Техническая характеристика ЭПС

Наименование параметра	Значение	
	Печь №7	Печь №8
Мощность печи, кВт	533,5	
Число тепловых зон, шт.	5	
Максимальная температура в печи, °С	1050	
Напряжение сети, В	380	
Материал нагревателей	KANTHAL A-1	X23Ю5Т
Диаметр нагревателей, мм	10	
Масса печи, кг	54050	
Габаритные размеры печи, мм длина ширина высота	23800; 4134; 2728	
Размеры рабочего (внутреннего) пространства печи, мм длина ширина высота	6800; 1200; 250	9900; 1970; 870
Количество подин, шт.	2	
Скорость передвижения камеры, м/мин	2	

Прессованные профили с помощью электромостового крана транспортируются к растяжной машине усилием 0,5 МН, используемой для правки с нагревом. Техническая характеристика данной растяжной машины приведена в таблице 7 [9].

Таблица 7 – Техническая характеристика растяжной машины 0,5 МН

Наименование параметра	Значение
Растягивающее усилие, МН	Не более 0,5
Ход передней головки, мм	Не более 1500
Скорость рабочего хода, м/с	Не более 0,025
Скорость обратного хода, м/с	От 0,035 до 0,350 включ.
Длина растягиваемого изделия, мм	От 1500 до 8500 включ.
Диаметр описанной окружности поперечного сечения изделия, мм	Не более 100
Угол поворота передней головки, градус	Не более 360
Мощность установки контактного нагрева, кВт	240
Напряжение между губками контактного нагрева, В	От 55 до 80 включ.
Сила тока, кА	6
Напряжение переменного тока питающей сети, В	1×380

В случае обнаружения несоответствия количества водорода в сплаве установленным требованиям проводится дегазационный отжиг с помощью вакуумной печи ОКБ-654 с последующей повторной правкой на растяжной машине усилием 0,5 МН, травлением и промывкой. Печь оборудована системами регулирования и регистрации температуры печи, измерения и регистрации температуры садки. Печь ОКБ-654 также оснащена системой регулирования, регистрации и аварийной сигнализации по превышению температуры.

Техническая характеристика контейнерной вакуумной печи ОКБ-654 приведена в таблицах 8 и 9 [10].

Таблица 8 – Техническая характеристика вакуумной печи ОКБ-654

Наименование параметра	Значение
Рабочая температура, °С минимальная максимальная	500; 800
Число зон, шт.	4
Остаточное давление, Па	0,666
Максимальная масса садки, кг	350
Максимальный диаметр отжигаемых изделий, мм	160
Размеры рабочего пространства муфеля, мм диаметр длина	270; 7000
Мощность печи, кВт	280

Таблица 9 – Характеристика зон печи ОКБ-654

Характеристика зон печи	I, IV	II, III
Мощность, кВт	60	80
Напряжение, В	160	380
Ток линейный, А	211	211
Схема соединения нагревателей	треугольник	звезда

#### 1.4 Виды и причины возникновения брака

Дефект – это любое отклонение от технических условий, ГОСТов, ОСТов на поставку профиля, выходящее за пределы допуска. Основными видами дефектов являются геометрические, поверхностные, микро- и макроструктурные дефекты.

К геометрическим дефектам относят нарушение угловых размеров, несплошность, гофрообразование, продольная кривизна, поперечная кривизна, скрутка. К поверхностным дефектам относят риски, царапины,

надиры, налипы, пузыри, плены, отслоения, трещины. К микро- и макроструктурным дефектам относят шиферный излом, крупнокристаллический ободок, пресс-утяжину, трещины.

Управление несоответствующей продукцией и оформление листов несоответствий осуществляют в соответствии с требованиями ТИ-03-040-Т-2014 «Производство тонкостенных профилей из титана и его сплавов на прессе усилием 31,5 МН» [6]. В таблице 10 приведены основные виды несоответствующей продукции и причины их возникновения при производстве тонкостенных профилей на прессе усилием 31,5 МН.

Таблица 10 – Виды несоответствий продукции и причины возникновения

Виды несоответствий продукции	Причины возникновения несоответствий	Способы устранения
1. Недопрессовка заготовки или пресс-остаток более допустимого значения	<ul style="list-style-type: none"> <li>– недостаточное давление в гидросистеме пресса или резкое снижение давления;</li> <li>– низкая температура заготовки перед прессованием</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– прекратить прессование до восстановления требуемого давления в гидросистеме пресса;</li> <li>– уменьшить время с момента выгрузки заготовки из печи до подачи ее в контейнер</li> </ul>
2. Грубые продольные риски, плены, отслоения металла на поверхности профиля	<ul style="list-style-type: none"> <li>– локальное разрушение матрицы;</li> <li>– налипы металла</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– тщательно контролировать качество поверхности матриц перед прессованием;</li> <li>– контролировать состояние поверхности матрицы перед прессованием</li> </ul>
3. Несоответствие размеров профиля	<ul style="list-style-type: none"> <li>– несоответствие размеров очка матрицы утвержденному чертежу;</li> <li>– недостаточное обжатие матрицы входным посадочным конусом контейнера;</li> <li>– нарушение центровки</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– проверять размеры очка матриц;</li> <li>– заменить контейнер пресса;</li> <li>– проверить и отрегулировать центровку инструмента;</li> <li>– остановить прессование;</li> <li>– заменить контейнер пресса</li> </ul>

Виды несоответствий продукции	Причины возникновения несоответствий	Способы устранения
4. Вмятины на поверхности профиля	– запрессовка в поверхность профиля остатков стеклографитной смазки с поверхности втулки контейнера	– очищать поверхность втулки контейнера от налипшей стеклографитной смазки перед прессованием нагретым пресс-остатком
5. Повышенное скручивание профиля вокруг продольной оси на желобе прессы	– недостаточная скорость прессования; – изготовление рабочих поясков матриц, несоответствующих чертежу	– провести корректировку скорости прессования; – замена матриц
6. Превышение кривизны профиля по углу скрутки (более $\frac{1}{4}$ оборота относительно осевой линии профиля)	– недостаточно проведен разворот профиля ключом на желобе профиля	– своевременно производить раскручивание профиля на желобе прессы ключом, до снижения температуры профиля, контролировать угол скручивания визуально
7. Длина профиля после прессования менее расчетной	– прессование с установленным ограничителем хода пресс-штемпеля (увеличенная высота пресс-остатка)	– не допускать прессование толстостенного профиля с установленным ограничителем хода пресс-штемпеля

## 2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

### 2.1 Технологическая схема производства изделия

Общая производственная схема производства полосульбовых профилей марки ПТ14-8 из сплава ПТ-3В представлена на рисунке 4.

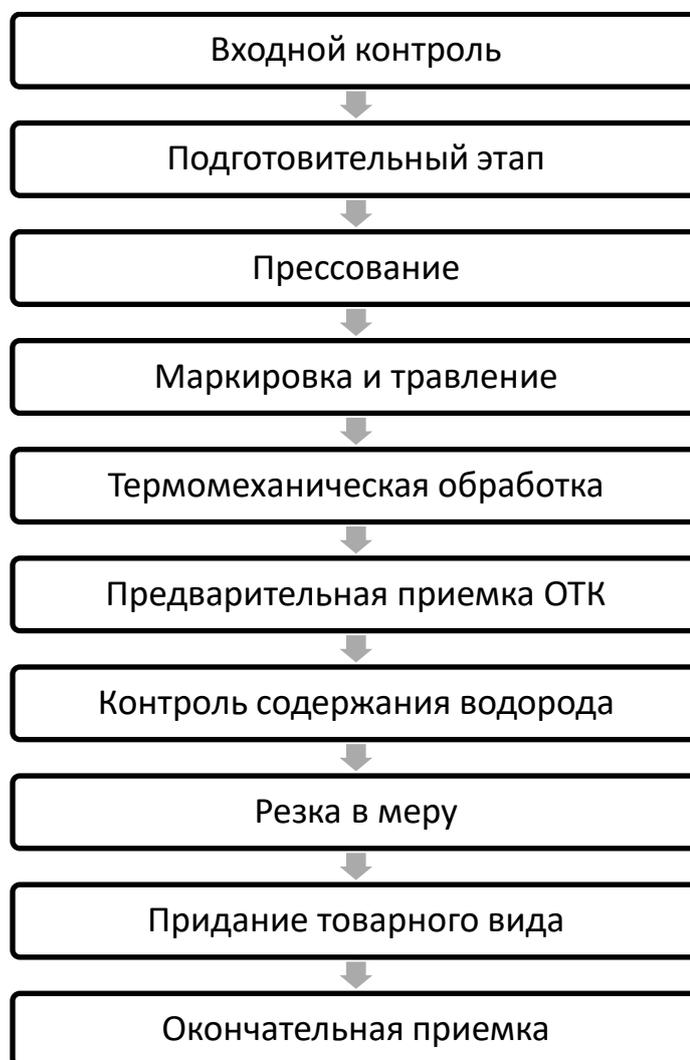


Рисунок – 4. Блок-схема производственного процесса полосульбового профиля ПТ14-8 из сплава ПТ-3В

На этапе входного контроля проводят начальные операции по контролю и доводке матриц, а также их напыление диоксидом циркония на плазменной установке. Матрица должна соответствовать утвержденному чертежу. Материал матрицы – сталь 4Х5МФС [2].

На подготовительном этапе производят входной контроль и изготовление заготовки для прессования на токарном станке. Используемая при изготовлении профиля ПТ14-8 заготовка имеет размеры  $\text{Ø}223^{+1/-2} \times L$ , где L

– длина заготовки согласно заявке цеха в миллиметрах. Заготовка должна соответствовать чертежу шашки Ш-22, ее диаметр уменьшается до 220 мм.

На следующем этапе производится подготовка заготовок к прессованию: производят обмазку боковой поверхности заготовок смазкой «ЭВТ-24» при помощи губки с последующей сушкой. При производстве применяется следующий метод нагрева заготовок: заготовка нагревается в индукционной установке ОКБ-755 до температуры 950-1100°C, после чего ее температура выравнивается в ЭПС при температурном режиме  $T = 1100^\circ\text{C}$  с выдержкой в течение 20 минут. Это позволяет обеспечить равномерность температуры по всему объему, а также минимизировать образование окалины. По окончании данных операций производится непосредственно само прессование на прессе усилием 30,891 МН. Прессование производится в  $\beta$ -области при температуре выше температуры полиморфного превращения. В этих условиях деформирования образуется достаточно однородная по длине и сечению мелкозернистая макроструктура 1-3 балла десятибалльной шкалы зернистости. Микроструктура состоит из равноосных зерен размером 100-200 мкм [11].

После прессования полученный профиль маркируют ударным клеймом с выходного конца и подвергают щелочению в щелочной ванне. Операция проводится при температуре  $T_{\text{расплава}} = 410^\circ\text{C}$  в течение 15-40 минут в расплаве NaOH и  $\text{NaNO}_3$  с последующей промывкой в горячей воде при температуре  $T_{\text{воды}} = (40-60)^\circ\text{C}$  в течение 10-30 минут [12]. Это позволяет избавиться от возникшей в результате прессования окалины и устранить следы стеклосмазки. С помощью абразивно-отрезного станка модели 8252 производится обрезка концов по необходимости. Маркировка профиля после операции переносится.

На следующем этапе профиль подвергается отжигу в ЭПС при температурном режиме  $T = 840^\circ\text{C}$  в течение 45 минут с последующим охлаждением на воздухе. Применение упрочняющей термообработки с промежуточной правкой в закаленном состоянии при температурах старения

позволяет получить высокопрочные профили. Далее профиль подвергается правке при температуре  $T = (700-800)^\circ\text{C}$  со степенью деформации 2-3%, после чего вновь подвергается щелочному травлению, а также осветлению. Это позволяет устранить газонасыщенный слой. Титан и его сплавы при температурах нагрева для горячей деформации или термической обработки активно взаимодействуют с кислородом, азотом и другими кислородосодержащими газами атмосферы. При нагреве на воздухе на поверхности заготовок образуется окалина, начинающая отслаиваться при температурах выше  $900^\circ\text{C}$ . Однако наряду с образованием окалины происходит диффузия кислорода и азота вглубь металла с образованием поверхностных газонасыщенных слоев. Эти слои характеризуются высокой твердостью и низкой пластичностью. Наличие газонасыщенного слоя на поверхности готового профиля приводит к пониженным показателям пластичности при испытаниях на разрыв, изгиб. Удаление окалины достигается в результате химической реакции между окислами и щелочным расплавом, а также термомеханического эффекта. При погружении окисленного титана в расплав вследствие различных коэффициентов термического расширения металла и окалины происходит ее растрескивание, и расплав благодаря высоким смачивающим свойствам проникает к граничным слоям системы металл-окалина. Происходит окисление низших окислов титана до высших, а также взаимодействие щелочного расплава с основным металлом. Осветление проводится при температуре  $T_{\text{раствора}} = 50 \pm 1^\circ\text{C}$  в течение 1-2 минут с последующей промывкой при  $T_{\text{воды}} = (15-25)^\circ\text{C}$  в течение 3-5 минут.

Полученный профиль сдается на предварительную приемку ОТК: производится контроль геометрических размеров профиля и качества его поверхности, после чего при необходимости производится зачистка дефектов ручной шлифовальной машинкой и травление в размер при  $T_{\text{раствора}} = (50 \pm 1)^\circ\text{C}$  в течение 5-20 минут с контролем величины стравливаемого слоя и последующей промывкой в холодной воде.

От двух профилей из получаемой партии вырезаются образцы для контроля содержания водорода. Содержание Н в металле профилей не должно превышать 0,008% массовых долей. При необходимости проводится дегазационный отжиг при температурном режиме  $T_{\text{отжига}} = 750^{\circ}\text{C}$  с выдержкой в течение 3 ч, а также правка с нагревом до температуры  $T_{\text{правки}} = (700-800)^{\circ}\text{C}$  и щелочное травление с последующей промывкой в горячей воде.

Далее производится разбраковка профилей по кривизне и скручиванию, а также разметка профилей для последующей вырезки образцов и перенос маркировки. Захватки, полученные после правки, обрезают, и при необходимости профиль подвергают правке, после чего при соответствии установленным требованиям свойств и структуры режут на кратные длины с помощью абразивно-отрезного станка модели 8252. При этом два образцовых профиля режут на величину, несколько большую мерной длины.

Следующий этап производственного процесса предназначен для придания партии профилей товарного вида. Торцы, полученные при резке в меру, зачищают вручную, после чего проводят осветление с промывкой в холодной воде. Образцовые профили также зачищают и промывают.

На заключительном этапе партия проходит окончательную приемку, маркировку и контроль на соответствие сплаву с последующим взвешиванием и упаковкой. Для партии оформляются необходимые документы. Профили транспортируют уложенными связками в деревянные решетчатые ящики массой (брутто) не более 500 кг. Связки профилей должны быть завернуты в битуминированную упаковочную бумагу. Сертификат соответствия должен содержать такую информацию, как марка сплава, масса и номер профиля, номер плавки и партии с указанием количества профилей, входящих в партию, а также результаты анализов и испытаний и др [2].

## **2.2 Определение размеров и массы мерной заготовки**

Определение размеров слитка и мерной заготовки проводится по методике, приведенной в работе [13]. Длину заготовки при прессовании профилей постоянного сечения определяют по формуле (1).

$$L_{рас} = \frac{[(l_{пф} + l_{пр}) \cdot m + l_{ко}] \cdot n \cdot F_{пф}}{F_{заг}} + h_{по} \cdot \mu_p, \quad (1)$$

- где  $l_{пф}$  – длина готового профиля;  
 $l_{пр}$  – припуск на длину, мм;  
 $m$  – кратность профилей в прессовке, мм;  
 $l_{ко}$  – длина концевой обрезки, мм;  
 $n$  – число каналов в матрице, мм;  
 $h_{по}$  – толщина пресс-остатка, мм;  
 $F_{заг}$  – площадь сечения соответственно заготовки, мм;  
 $F_{пф}$  – площадь сечения готового профиля, мм;  
 $\mu_p$  – коэффициент распрессовки.

Исходные данные для проведения расчетов приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Исходные данные для определения параметров слитка.

Параметр	Значение
Длина готового профиля, мм	4000
Длина обрезки с утяжинного конца, мм	700
Длина обрезки с выходного конца, мм	300
Диаметр заготовки, мм	220
Высота пресс-остатка, мм	46
Диаметр контейнера, мм	230
Положительный допуск на слиток, мм	8
Длина захваток, мм	500
Допуск на вырезку образцов, мм	100

В контейнере используются рабочие втулки диаметром 170, 200, 230, 280 мм. Значения высоты пресс-остатка и диаметра слитка выбраны с целью повышения выхода годного, а также обеспечения оптимального усилия прессования. Помимо приведенных в таблице 11 значений необходимо также учесть допуск на длину профиля для вырезки образцов и зачистки

поверхности. Площадь поперечного сечения контейнера определяется по формуле (2):

$$F_{\kappa} = \frac{D_{\kappa}^2 \cdot \pi}{4}, \quad (2)$$

где  $D_{\kappa}$  – диаметр контейнера, мм.

При диаметре контейнера  $D_{\kappa} = 230$  мм площадь поперечного сечения контейнера равна

$$F_{\kappa} = \frac{230^2 \cdot \pi}{4} = 41547,6 \text{ мм}^2.$$

Используя формулу (2), определим также площадь поперечного сечения цилиндрической заготовки диаметром 220 мм.

$$F_{\text{заг}} = \frac{D_{\kappa}^2 \cdot \pi}{4} = \frac{220^2 \cdot \pi}{4} = 38013,3 \text{ мм}^2.$$

Значение толщины пресс-остатка равно

$$(0,2-0,3)D_{\kappa} = 46 \text{ мм}.$$

Коэффициент распрессовки определяется по формуле (3).

$$\mu_{\text{р}} = \frac{F_{\kappa}}{F_{\text{заг}}}. \quad (3)$$

При  $F_{\kappa} = 41547,6 \text{ мм}^2$ ;  $F_{\text{заг}} = 38013,3 \text{ мм}^2$ , коэффициент распрессовки равен

$$\mu_{\text{р}} = \frac{F_{\kappa}}{F_{\text{заг}}} = \frac{41547,6}{38013,3} = 1,09.$$

Площадь поперечного сечения  $F_{\text{изд}}$  получаемого профиля составляет 1113 мм<sup>2</sup>. Данное значение получено с помощью программного пакета КОМПАС-3D.

Исходя из полученных данных, расчетная длина заготовки равна

$$L_{\text{рас}} = \frac{(4000 + 700 + 300 + 500 + 100) \cdot 1113}{38013,3} + 46 \cdot 1,09 = 215,2 \text{ мм}.$$

С учетом положительного допуска на длину заготовки, получаем конечное значение длины заготовки:

$$L_{\text{заг}} = 215,2 + 8 = 223,2 \text{ мм.}$$

Таким образом, для изготовления полособульбового профиля марки ПТ14-8 из сплава ПТ-3В требуется заготовка диаметром 220 мм и длиной 223,2 мм.

Определим массу заготовки по формуле (4):

$$m_{\text{заг}} = L_{\text{заг}} \cdot F_{\text{заг}} \cdot \rho, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность сплава, равная 4450 кг/м<sup>3</sup>.

При  $L_{\text{заг}} = 223,2$  мм,  $F_{\text{заг}} = 38013,3$  мм<sup>2</sup> и  $\rho = 4450$  кг/м<sup>3</sup> масса заготовки равна

$$m_{\text{изд}} = 223,2 \cdot 38013,3 \cdot 4450 = 37,756 \text{ кг.}$$

### 2.3 Определение температурно-скоростных условий прессования

Температура полиморфного превращения сплава ПТ-3В – 970°С, прессование по технологическим требованиям производится в  $\beta$ -области. Таким образом, назначим температуру нагрева заготовки перед прессованием равной 1100°С, при этом температура должна быть однородна по всему объему заготовки. Данная температура является максимальной для ЭПС, используемых для нагрева заготовок прессы 31,5 МН.

Выбранный температурный режим соответствует требованиям структуры и механических свойств получаемого полуфабриката, а также позволяет снизить энергосиловые требования на изготовление изделия. Скорость прессования обуславливается характеристиками прессы и равна 100 мм/с.

Коэффициент вытяжки вычисляется по формуле (5):

$$\lambda = \frac{F_{\text{к}}}{F_{\text{изд}}}. \quad (5)$$

При  $F_{\text{к}} = 41547,6$  мм;  $F_{\text{изд}} = 1163,7$  мм коэффициент вытяжки равен

$$\lambda = \frac{41547,6}{1113} = 37,33.$$

Из условия постоянства секундных объемов скорость истечения металла  $v_{и}$  определяется через скорость прессования  $v_{п}$  по формуле (6):

$$v_{и} = \lambda \cdot v_{п}. \quad (6)$$

При  $\lambda = 35,7$ ;  $v_{п} = 100$  м/с скорость истечения металла равна

$$v_{и} = 35,7 \cdot 100 = 3570 \text{ мм/с}.$$

Исходя из известной формулы площади поперечного сечения, зная скорость истечения металла, определим скорость деформации на основной стадии по формуле (7) [14].

$$\xi = \frac{6 \cdot \ln \lambda \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot v_{и}}{(\lambda \cdot \sqrt{\lambda} - 1) \cdot d}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – расчетный угол образующей канала матрицы, град;

$d$  – диаметр равновеликого по площади круга, мм.

Диаметр равновеликого круга рассчитывается исходя из формулы площади поперечного сечения (2) и равен 37,64 мм.

При  $\alpha = 60^\circ$ ;  $d = 37,64$  мм скорость деформации равна

$$\xi = \frac{6 \cdot \ln 37,33 \cdot \operatorname{tg} 60^\circ \cdot 3570}{(37,33 \cdot \sqrt{37,33} - 1) \cdot 37,64} = 16,42 \text{ с}^{-1}.$$

Полученные значения конечной степени деформации, скорости деформации, а также используемое значение температуры нагрева заготовки позволяют получить значение сопротивления деформации сплава ПТ-3В при данных температурно-скоростных условиях. На основе данных реологии материала, выбрав ближайшую доступную кривую (см. рисунок 2), получим, что значение сопротивления деформации не должно превышать 50 МПа. Кроме того, контейнер подвергается нагреву до температуры от 400°C до 420°C. Матрица предварительно должна быть просушена при температуре 200°C.

Последующие расчеты производятся в соответствии с заданными температурно-скоростными условиями.

## 2.4 Расчет размеров рабочего канала матрицы

Определение размеров канала матрицы на выходе проводится по формуле (8):

$$A = A_1 + M + (k_{вд} + k_p + k_t) \cdot A_1, \quad (8)$$

где  $A_1$  – номинальный размер профиля;

$M$  – плюсовой допуск на данный размер, мм;

$k_{вд}$  – коэффициент, учитывающий внеконтактную деформацию;

$k_p$  – коэффициент, учитывающий уменьшение размера при правке растяжением;

$k_t$  – величина температурной усадки профиля:

$$k_t = t_{пр} \cdot \alpha_{пр} - t_m \cdot \alpha_m, \quad (9)$$

где  $t_{пр}$  – температура профиля;

$t_m$  – температура матрицы;

$\alpha_{пр}$  – коэффициент линейного расширения материалов профиля при температуре прессования.

$\alpha_m$  – коэффициент линейного расширения материала матрицы при температуре прессования.

При  $t_{пр} = 1100^\circ\text{C}$ ;  $t_m = 20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_{пр} = 11,9 \cdot 10^{-6}$  1/град,  $\alpha_m = 13,9 \cdot 10^{-6}$  1/град:

$$k_t = 1100 \cdot 11,5 \cdot 10^{-6} - 20 \cdot 13,9 \cdot 10^{-6} = 0,0123.$$

Для толщины стенки профиля, равной 6,5 мм, размер на выходе будет равен сумме этого размера с плюсовым допуском и дополнительным допуском 7,5 мм. Толщина напылённого слоя составляет 0,4 мм. Результаты расчетов приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Размеры каналов матрицы на выходе

Размер профиля	$k_p$	$k_t$	Допуск	Размер канала
120	0,01	0,0123	1,5	123,5
30	0,01	0,0123	1	31,0
6,5	—	—	0,9	7,5

## 2.5 Расчет длины калибрующего пояска

Для расчета длины калибрующего пояска необходимо разбить профиль на отдельные участки с номинальными размерами. Полученные участки изображены на рисунке 5.

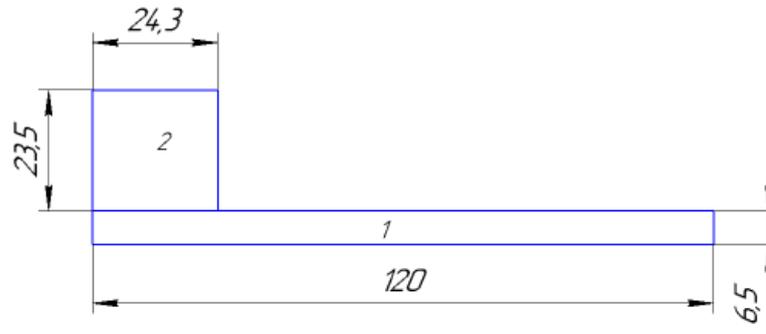


Рисунок – 5. Разбивка профиля на участки для расчета калибрующего пояска

Длины поясков на отдельных участках профиля должны быть обратно пропорциональны удельным периметрам этих участков:

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{\Pi_{y1}}{\Pi_{y2}},$$
$$l_2 = \frac{l_1 \cdot \Pi_{y1}}{\Pi_{y2}},$$

где  $l_1$  – длина участка 1, мм;

$l_2$  – длина участка 2, мм;

$\Pi_{y1}$  – удельный периметр участка 1;

$\Pi_{y2}$  – удельный периметр участка 2.

Удельные периметры равны для каждого участка отношению периметра к его площади:

$$\Pi_{y1} = \frac{2 \cdot (120 + 6,5)}{120 \cdot 6,5} = 0,32 \text{ мм}^{-1},$$

$$\Pi_{y2} = \frac{2 \cdot (24,3 + 23,5)}{24,3 \cdot 23,5} = 0,17 \text{ мм}^{-1}.$$

Зададим начальное значение  $l_1 = 3$  мм. Тогда:

$$l_2 = \frac{3 \cdot 0,32}{0,17} = 6 \text{ мм}.$$

Таким образом калибрующий поясок матрицы имеет размеры 3 и 6 мм. Эскиз пояска приведен на рисунке 6.

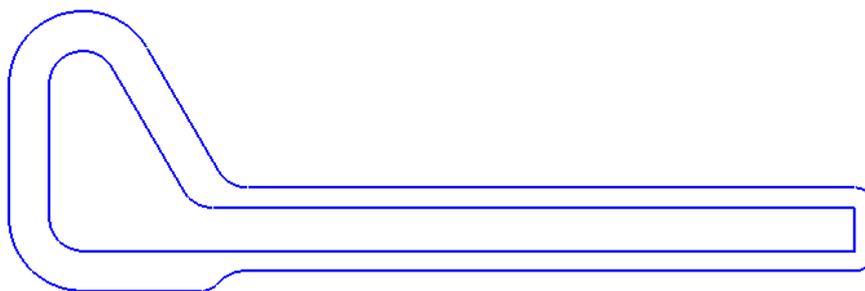


Рисунок – 6. Эскиз калибрующего пояска матрицы

Развертка рассчитанного калибрующего пояска матрицы представлена на рисунке 9.

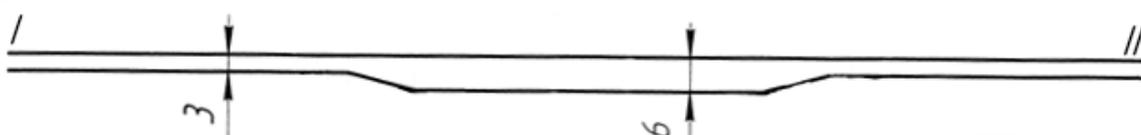


Рисунок – 7. Развертка калибрующего пояска матрицы

## 2.6 Расчет полного усилия прессования

Расчет полного усилия прессования производится по методике, приведенной в работе (10) [14].

$$P = R_m + T_m + T_{кр} + T_{п}, \quad (10)$$

где  $R_m$  – составляющая усилия на преодоление мощности внутренних сил (на собственно деформацию), МН;

$T_m$  – составляющая усилия на преодоление напряжений трения на поверхности матрицы или напряжений среза мертвой зоны, МН;

$T_{кр}$  – составляющая усилия на преодоление напряжений трения на стенках контейнера, МН;

$T_{п}$  – составляющая усилий на преодоление напряжений трения на калибрующем пояске матрицы, МН.

Составляющие формулы полного усилия прессования сложного профиля рассчитываются по методике И. Л. Перлина.

Формула составляющей усилия на преодоление мощности внутренних сил имеет вид:

$$R_m = \frac{\pi(i + i_d)}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}} 2\sigma_s D_k^2, \quad (11)$$

где  $i$  – натуральный логарифм коэффициента вытяжки;

$i_d$  – дополнительная интегральная деформация при прессовании некруглых профилей;

$\sigma_s$  – сопротивление деформации.

Натуральный логарифм коэффициента вытяжки  $i$  равен:

$$i = \ln \lambda = \ln 37,33 = 3,62.$$

Дополнительная интегральная деформация определяется по формуле:

$$i_d = \ln_4 \sqrt{\frac{F_{\text{изд}}}{a_{\text{ср}}^2}}, \quad (12)$$

где  $a_{\text{ср}}$  – средняя ширина профиля, определяемая после разбивки поперечного сечения профиля, определяемая после разбивки поперечного сечения профиля на  $k$  приблизительно прямоугольных участков равной площади.

Разбивка профиля на участки изображена на рисунке 8:



Рисунок – 8. Разбивка профиля на участки ( $k = 10$ )

Полученные значения суммируются для получения величины средней площади профиля по формуле (13).

$$a = \frac{1}{k} \sum_i^k a_i, \quad (13)$$

Суммируя значения на рисунке 8, получим  $a = 113,3$  мм. Тогда при  $F_{\text{пр}} = 1113$  мм<sup>2</sup>,  $a = 113,3$  мм найдем значение дополнительной интегральной деформации.

$$i_d = \ln \sqrt[4]{\frac{1113}{113,3}} = 0,52.$$

Полученные значения позволяют определить составляющую  $R_m$ :

$$R_m = \frac{\frac{\pi}{4}(3,575 + 0,52)}{\cos^2 \frac{60^\circ}{2}} \cdot 2 \cdot 50 \cdot 230^2 = 22,93 \text{ МН.}$$

Значение составляющей усилия на преодоление напряжений трения на поверхности матрицы или напряжений среза мертвой зоны рассчитывается по формуле:

$$T_m = \frac{\frac{\pi}{4} i}{\sin \alpha} D_k^2 f_m \sigma_s \quad (14)$$

где  $f_m$  – осредненный коэффициент трения на боковой поверхности матрицы, принимаемый за 0,144 при прессовании с использованием смазки [13].

Значение составляющей  $T_m$  будет равно:

$$T_m = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot 3,576}{\sin 60^\circ} \cdot 230^2 \cdot 0,144 \cdot 50 = 1,25 \text{ МН.}$$

Значение составляющей усилия на преодоление напряжений трения на стенках контейнера определяется по формуле:

$$T_{кр} = \pi D_k L f_k \sigma_s, \quad (15)$$

где  $L$  – длина распрессованного слитка, мм;

$f_k$  – осредненный коэффициент трения на боковой поверхности контейнера, принимаемый за 0,144 при прессовании с использованием смазки [13].

Значение составляющей  $T_{кр}$  будет равно:

$$T_{кр} = \pi \cdot 230 \cdot 223,2 \cdot 0,144 \cdot 50 = 1,16 \text{ МН.}$$

Значение составляющей усилий на преодоление напряжений трения на калибрующем пояске матрицы определяется по формуле:

$$T_{\text{п}} = \lambda \Pi m_{\text{п}} f_{\text{п}} \sigma_s, \quad (16)$$

где  $\Pi$  – периметр некруглого профиля;

$m$  – количество одновременно получаемых изделий;

$f_{\text{к}}$  – осредненный коэффициент трения на калибрующем пояске матрицы, принимаемый за 0,144 при прессовании с использованием смазки [13].

Значение составляющей  $T_{\text{п}}$  будет равно:

$$T_{\text{п}} = 35,7 \cdot 284,7 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 0,144 \cdot 50 = 0,77 \text{ МН.}$$

С учетом всех найденных составляющих, определим полное усилие прессования профиля:

$$P = 22,93 + 1,25 + 1,16 + 0,77 = 26,11 \text{ МН}$$

Полученное значение  $P$  не превышает максимальное усилие используемого пресса, что свидетельствует о возможности изготовления полособульбового профиля марки ПТ14-8 на прессе усилием 31,5 МН при данных температурно-скоростных условиях.

## 2.7 Расчет теплового эффекта деформации

Изменение температуры в процессе прессования определяется по формуле Ю.Л. Стерника:

$$\Delta T = \frac{p_R}{c_{\text{заг}} \cdot \rho} \cdot \gamma - (t_{\text{заг}} - t_{\text{к}}) \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{8 \cdot b_{\text{к}}}{(b_{\text{заг}} + b_{\text{к}}) \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{\eta}{Pe}} \right] \right\}, \quad (17)$$

где  $p_R$  – напряжение в очаге деформации, МПа;

$c_{\text{заг}}$  – удельная теплоемкость сплава, равная 0,963 кДж/К·кг;

$\gamma$  – функция критерия Пекле;

$Pe$  – критерий Пекле;

$t_{\text{заг}}$  – температура заготовки, равная 1100°C;

$t_{\text{к}}$  – температура контейнера, равная 400°C;

$b_{\text{заг}}$  – коэффициент аккумуляции тепла заготовки;

$b_{\text{к}}$  – коэффициент аккумуляции тепла контейнера;

$\eta$  – показатель стадии прессования.

Критерий Пекле определяется по формуле (16):

$$Pe = \frac{v_{II} \cdot D_K}{a_{заг}}, \quad (18)$$

где  $a_{заг}$  – коэффициент температуропроводности, в свою очередь определяемый по формуле (17):

$$a_{заг} = \frac{k_{заг}}{c_{заг} \cdot \rho}, \quad (19)$$

где  $k_{заг}$  – коэффициент теплопроводности материала заготовки.

При  $k_{заг} = 0,022$  кВт/мм·К коэффициент температуропроводности заготовки будет равен

$$a_{заг} = \frac{0,963}{0,456 \cdot 4450} = 51,78 \text{ мм}^2/\text{с},$$

На основе полученного значения  $a_{заг}$  определим значение критерия Пекле.

$$Pe = \frac{100 \cdot 230}{32,032} = 442,42.$$

Т.к. значение критерия Пекле превышает 5, то значение  $\gamma$  будет равно 1.

Напряжение в очаге деформации рассчитывается по формуле

$$p_R = \frac{R_M}{F_K}; \quad (20)$$

При  $R_M = 22,14$  МН;  $F_K = 41547,6$  мм<sup>2</sup>, напряжение  $p_R$  равно

$$p_R = \frac{22,93 \cdot 10^6}{41547,6} = 551,95 \text{ МПа}.$$

Показатель стадии прессования определяется по формуле (19)

$$\eta = \frac{L_{з(р)} - h_{по}}{D_K}, \quad (21)$$

где  $L_{з(р)}$  – длина заготовки после распрессовки, рассчитываемая в свою очередь по формуле (20).

$$L_{з(р)} = \frac{L_{заг}}{\mu_p}; \quad (22)$$

При  $L_{\text{заг}} = 223,2$  мм,  $\mu_p = 1,09$  длина заготовки после распрессовки будет равна

$$L_{\text{з(р)}} = \frac{223,2}{1,09} = 203,36 \text{ мм.}$$

При  $h_{\text{по}} = 46$  мм,  $D_k = 230$  мм показатель стадии прессования равен:

$$\eta = \frac{203,36 - 46}{230} = 0,684.$$

Коэффициент аккумуляции тепла для заготовки и контейнера определяется по общей формуле.

$$b = \sqrt{c \cdot \rho \cdot k}; \quad (23)$$

При  $c_{\text{заг}} = 0,963$  кДж/кг·К,  $\rho = 4450$  кг/м<sup>3</sup>,  $k = 0,022$  кВт/м·К значение коэффициент аккумуляции тепла для заготовки будет равно

$$b = \sqrt{0,963 \cdot 4450 \cdot 0,022} = 9751 \frac{\text{Вт} \cdot \sqrt{\text{с}}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Для контейнера, изготовленного из стали 27Х2Н2МВФ, коэффициент аккумуляции тепла при  $c_k = 0,62$  кДж/кг·К,  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $k = 0,043$  кВт/м·К значение коэффициента аккумуляции тепла для заготовки будет равно

$$b = \sqrt{0,62 \cdot 7800 \cdot 0,043} = 14420,4 \frac{\text{Вт} \cdot \sqrt{\text{с}}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Используя полученные ранее данные, определим изменение температуры заготовки в процессе прессования по формуле (15).

$$\Delta T = \frac{551,95}{0,963 \cdot 4500} - (1100 - 400) \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{8 \cdot 9751}{(9751 + 14420,4) \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{0,684}{442,42}} \right] \right\} = 151,808^\circ \text{C}.$$

На основе полученного значения  $\Delta T$  можно сделать вывод о том, что заготовка нагревается в процессе прессования. Повышение температуры на  $151^\circ \text{C}$  не оказывает значительного влияния на процесс прессования и не должно привести к образованию дефектов по причине термического процесса, так как не приводит к изменению фазы.

## 2.8 Расчет технико-экономических показателей

Технологические отходы, получаемые при прессовании, включают в себя пресс-остаток, обрезки с выходного и утяжинного конца, захватки для правки, а также образцы и темплеты для контроля механических свойств.

Коэффициент выхода годного определяется по формуле (24):

$$\text{КВГ} = \frac{m_{\text{изд}}}{m_{\text{заг}}} \cdot 100, \quad (24)$$

где  $m_{\text{изд}}$  – масса получаемого изделия, кг;

$m_{\text{заг}}$  – масса используемой заготовки, кг.

Определим массу получаемого изделия по формуле (25):

$$m_{\text{изд}} = L_{\text{изд}} \cdot F_{\text{изд}} \cdot \rho. \quad (25)$$

При  $L_{\text{изд}} = 4000$  мм;  $F_{\text{изд}} = 1113$  мм<sup>2</sup>;  $\rho = 4450$  кг/м<sup>3</sup>, масса готового профиля будет составлять

$$m_{\text{изд}} = 4000 \cdot 1113 \cdot 4450 = 19,811 \text{ кг.}$$

Таким образом, коэффициент выхода годного составит

$$\text{КВГ} = \frac{19,811}{37,756} \cdot 100 = 52,7\%$$

Рассчитанное значение коэффициента выхода годного близко к среднему для предприятия значения для тонкостенных профилей и говорит о целесообразности использования для изготовления полособульбового профиля заготовки рассчитанных размеров.

### 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Моделирование технологического процесса производится в программном пакете QForm, разработанным российской компанией «КванторФорм».

Постановка задачи начинается с переноса геометрии прессового инструмента в интерфейс программы. Комплектация предварительно собрана в программном пакете SolidWorks с целью последующего конвертирования в формат STEP. Иллюстрация сборки приведена на рисунке 9.

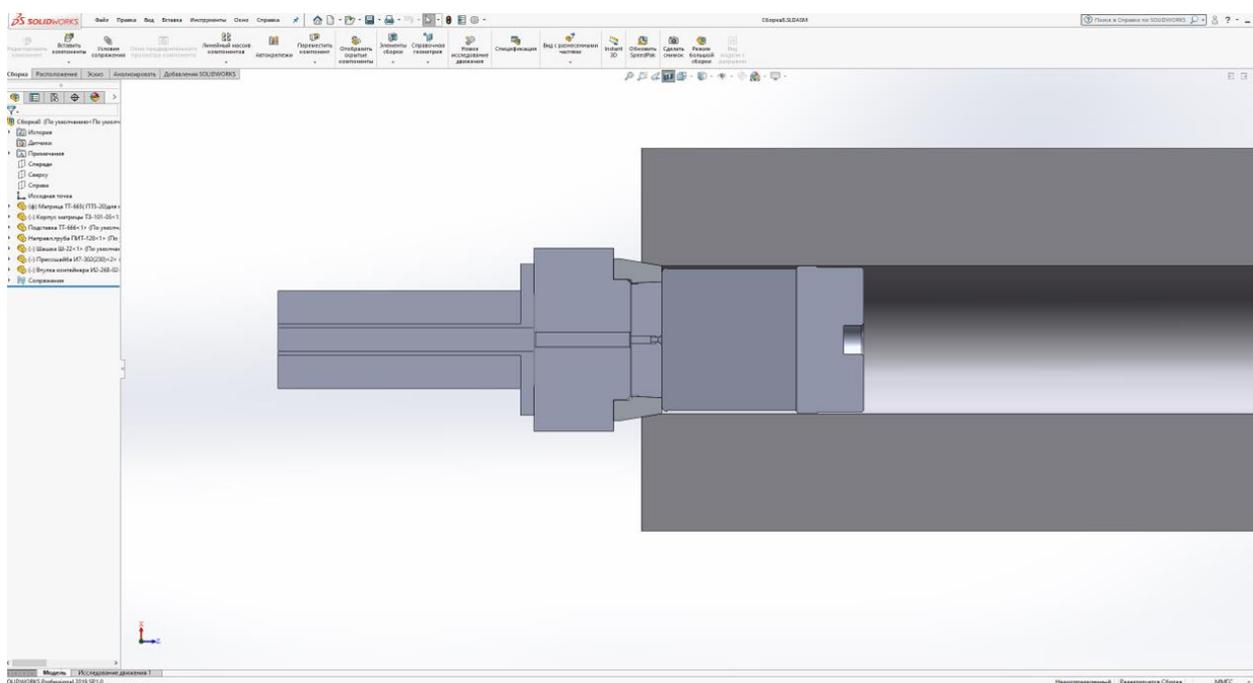


Рисунок – 9. Сборка прессового инструмента в формате STEP

Сборка в формате STEP перенесена в интерфейс QForm с заданием надлежащих граничных условий технологического процесса, таких как температура и материал заготовки и инструмента. Иллюстрация сборки прессового инструмента вместе с заготовкой в QForm приведена на рисунке 10.

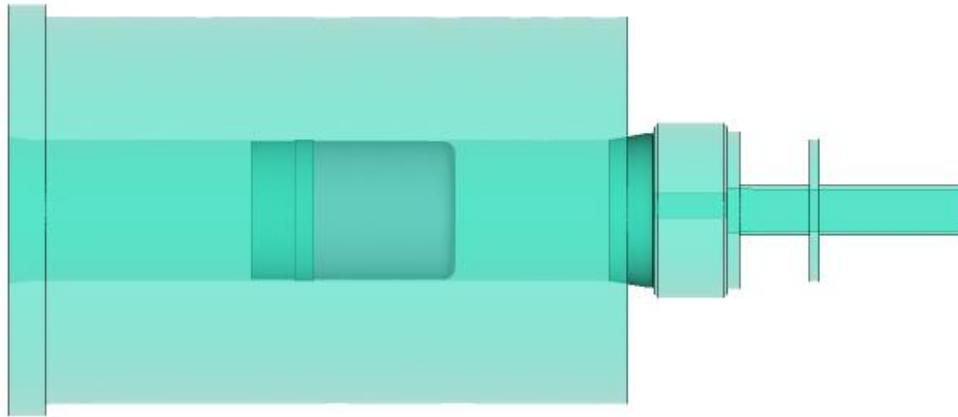


Рисунок – 10. Модель прессового инструмента в QForm

Моделирование процесса прессования в данном случае производится с использованием операции QForm «Гидравлика». На рисунке 11 приведены исходные данные для привода, характеризующего гидравлический пресс усилием 3150 тс.

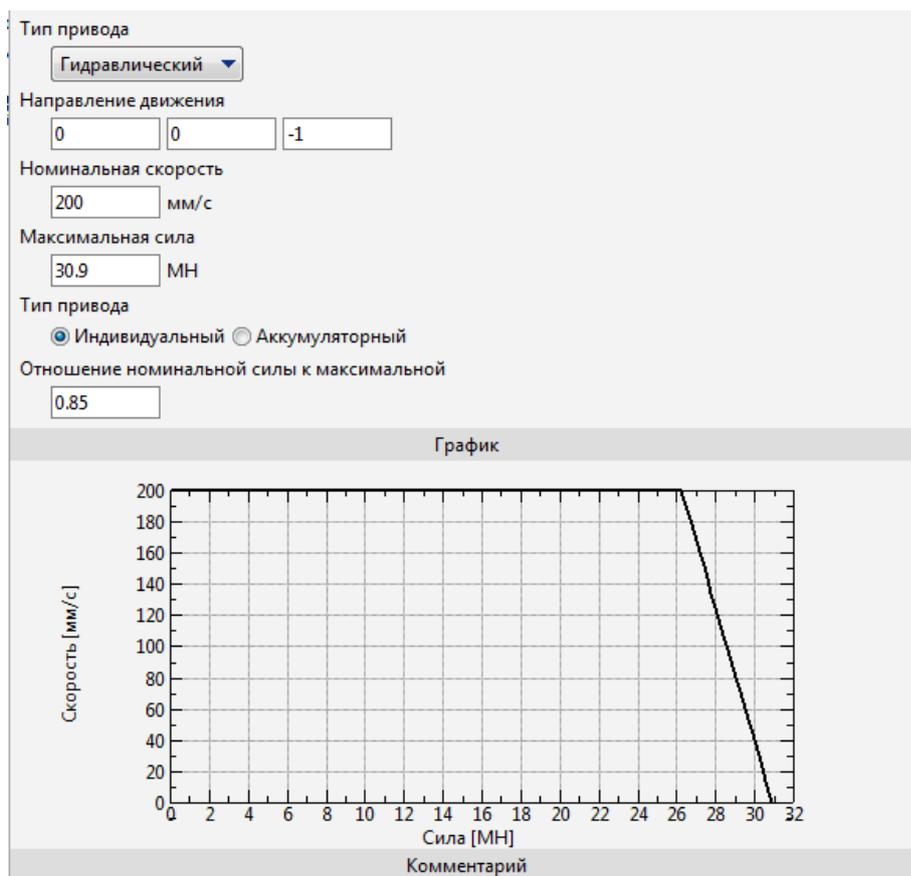


Рисунок – 11. Исходные данные привода операции «Гидравлика»

Задаваемыми свойствами сплава ПТ-3В являются химический состав и сопротивление деформации. Последнее задается в формате табличной

функции исходя из справочных данных. Табличная функция приведена на рисунке 12.

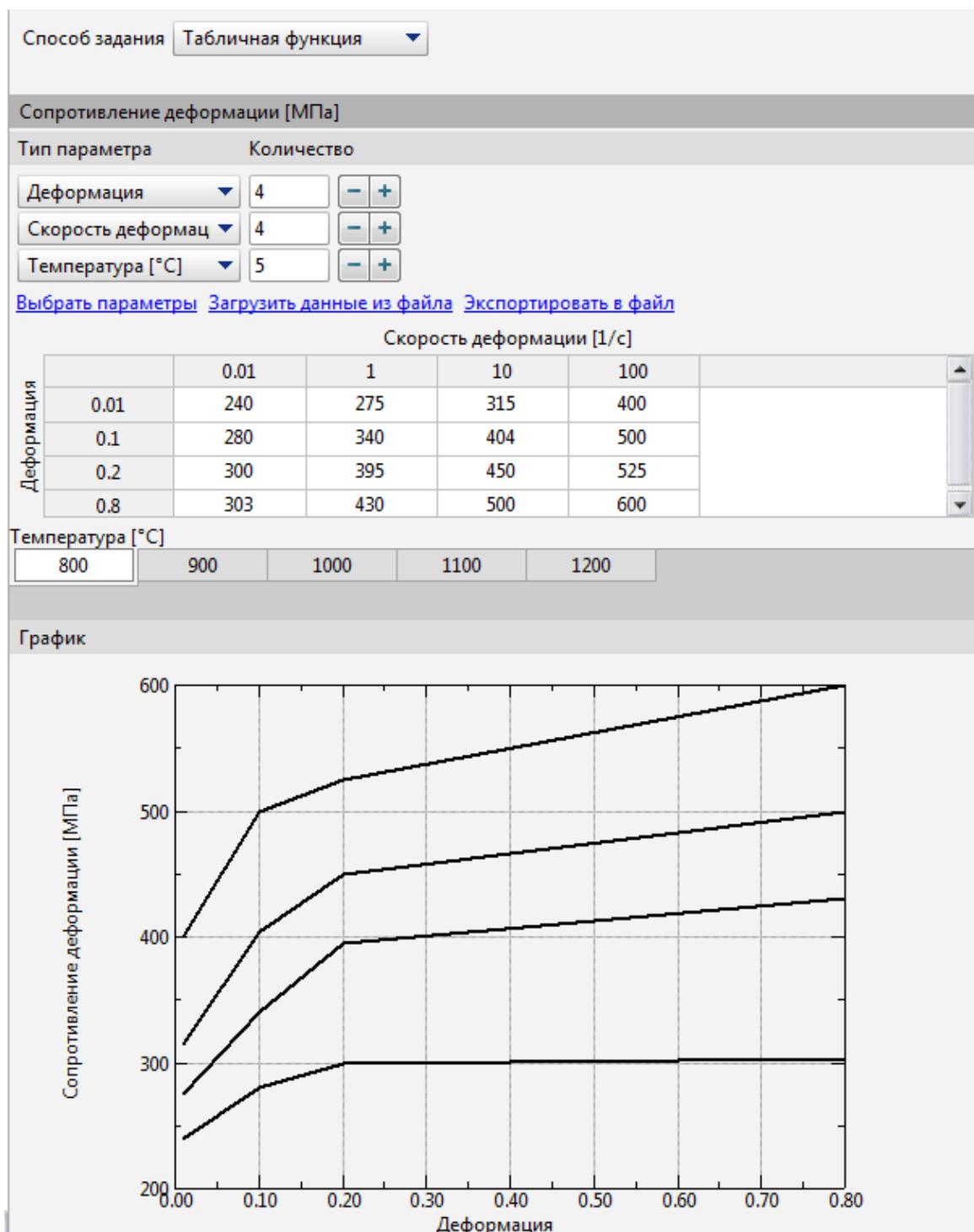


Рисунок – 12. Табличная функция сопротивления деформации сплава ПТ-3В

Важно отметить, что при моделировании спроектированной в предыдущем разделе матрицы обнаруживается дефект. При проведении моделирования было обнаружено, что в области «бульбы» профиля металл протекал значительно быстрее полки, в связи с чем упирался в направляющую

трубу. Полка замялась, что привело к недопрессовке. На рисунке 13 представлено примененное разбиение сечения профиля и результат моделирования с использованием полученной матрицы.

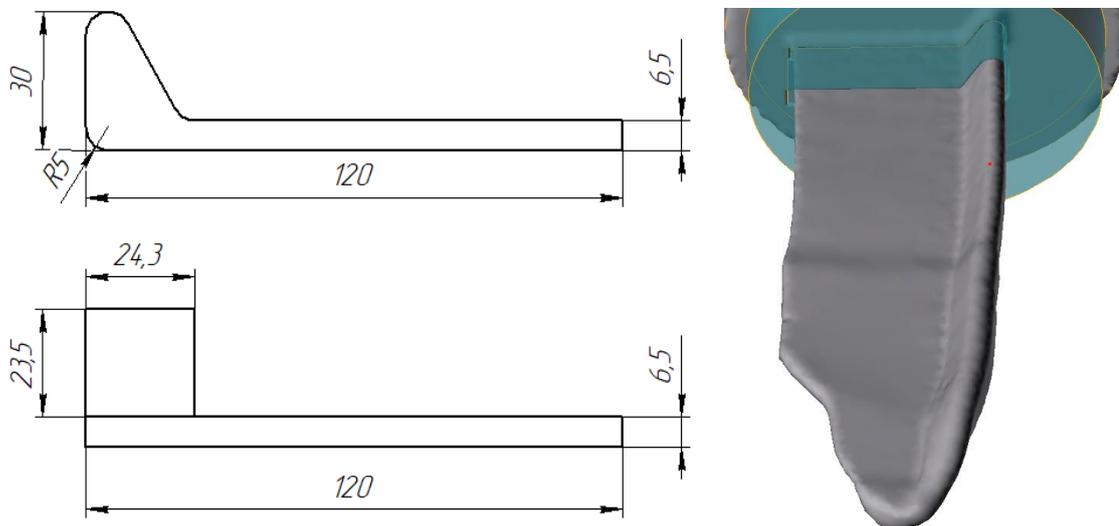


Рисунок – 13. Разбиение сечения профиля на прямоугольные элементы (слева) и последующее моделирование спроектированной матрицы (справа)

Была рассмотрена также другая методика, характеризующаяся разбивкой профиля на участки несимметричной формы и отделяющая бульбы полособульбового профиля от стенки и скруглений между ними. Для определения периметров и площадей полученных участков было использовано программное обеспечение КОМПАС-3D. Длины поясков при таком разбиении составили 3 мм для участка стенки профиля и 10 мм для бульбы. При проведении моделирования с использованием пресс-матрицы с длиной калибрующего пояска данных размеров было выявлено равномерное протекание металла в обоих участках.

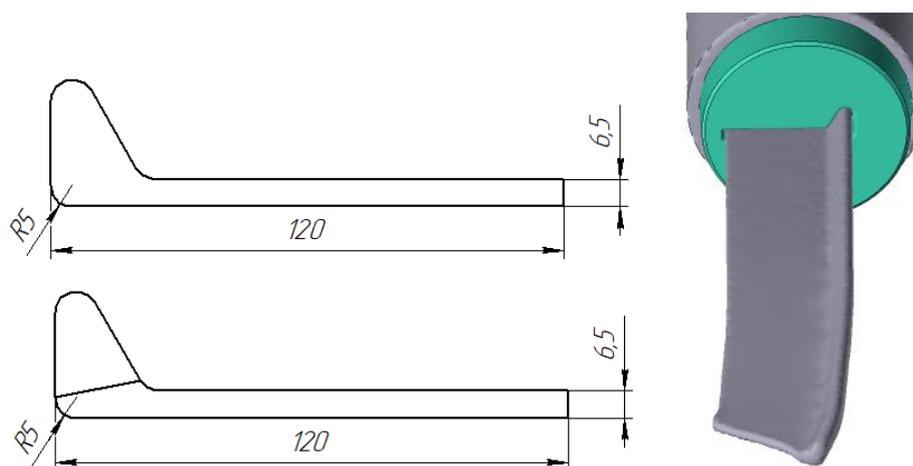


Рисунок – 14. Разбиение сечения профиля на элементы произвольной формы и последующее моделирование спроектированной матрицы.

Таким образом было установлено, что при расчете калибрующего пресс-изделия, обладающего полкой несимметричной, отличной от прямоугольной формы, рационально использовать разбиение на несимметричные участки, соответствующие непосредственно стенке и полке профиля. На рисунке 15 представлена модель на более дальних этапах расчета.

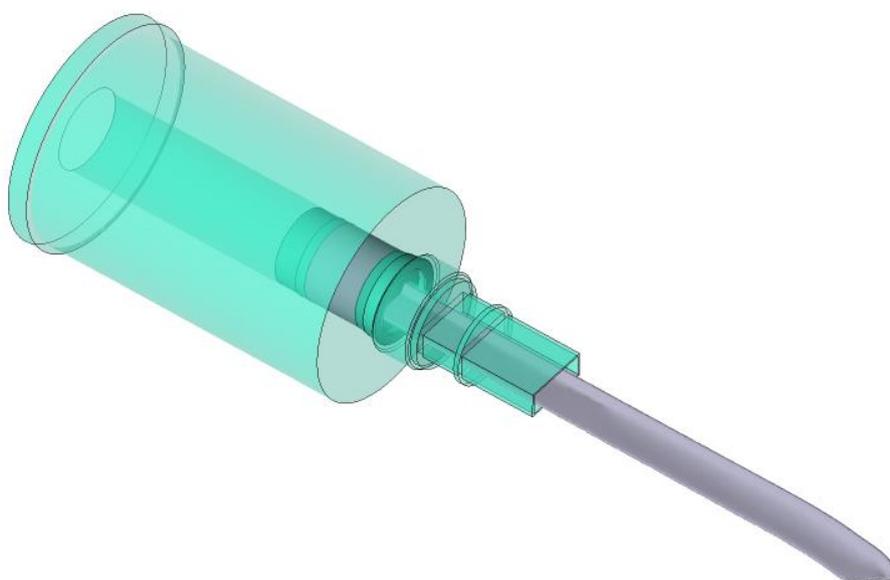


Рисунок – 15. Моделирование технологического процесса прессования полособульбового профиля (шаг 650)

В функционал программного обеспечения QForm также входит расчет различных показателей на каждом шаге. На рисунке 16 представлена карта среднего напряжения по объему заготовки в процессе прессования.

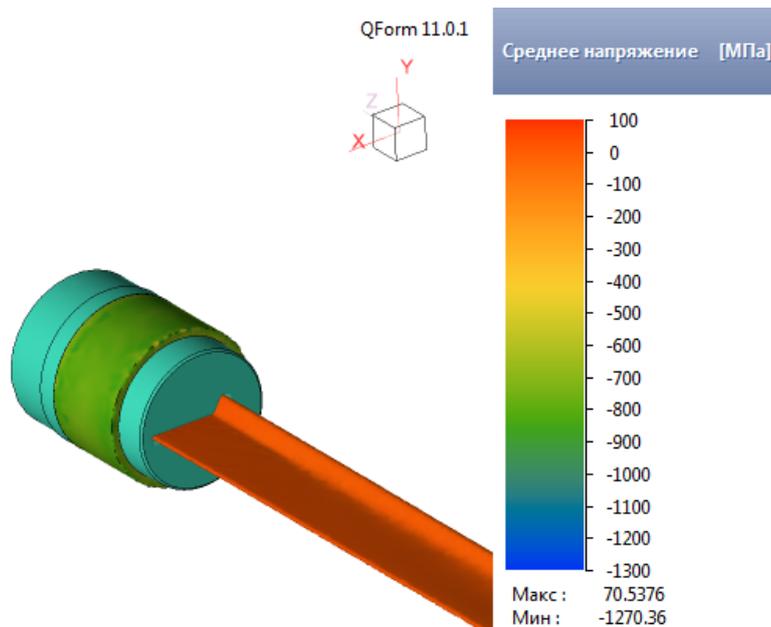


Рисунок – 16. Среднее напряжение по объему заготовки

На рисунке 17 представлена карта сопротивления деформации по объему заготовки в процессе прессования.

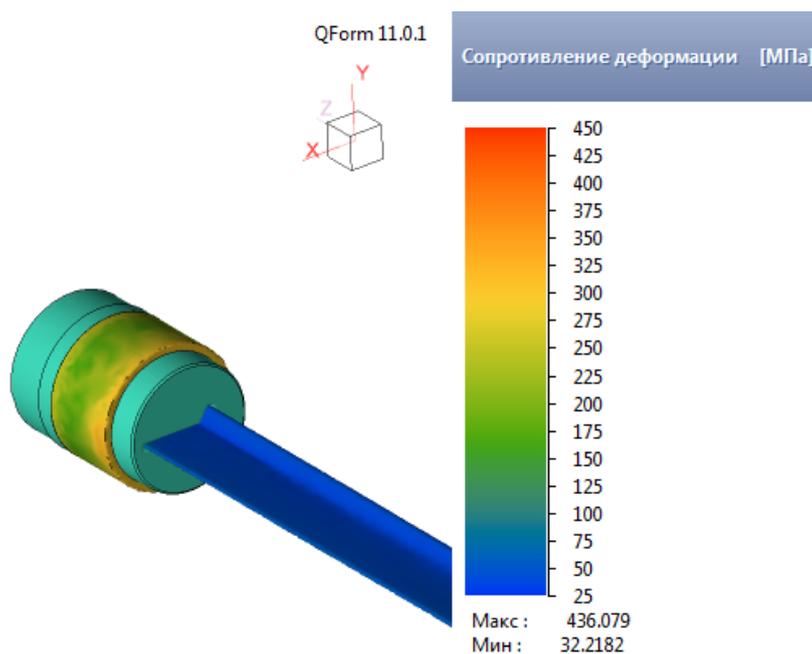


Рисунок – 17. Сопротивление деформации по объему заготовки

На рисунке 18 представлена карта пластической деформации по объему заготовки в процессе прессования.

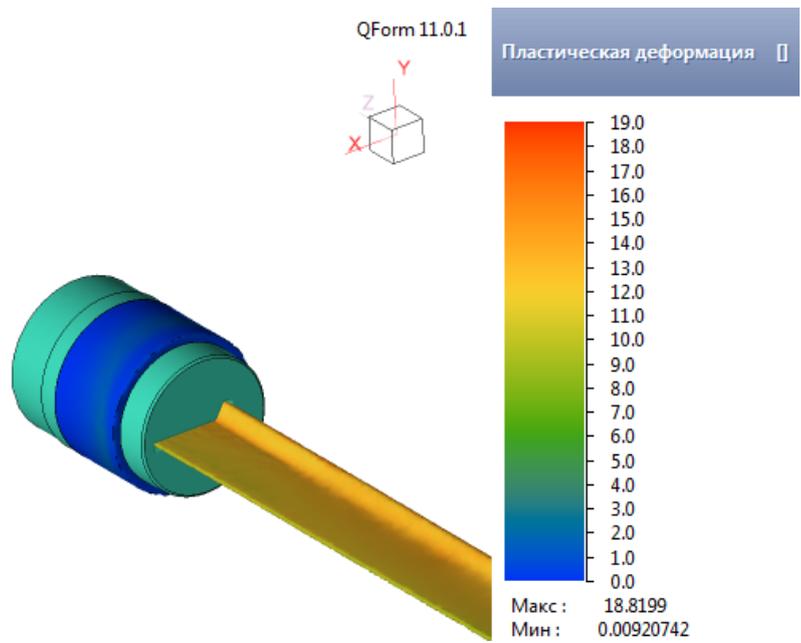


Рисунок – 18. Пластическая деформация по объему заготовки

На рисунке 19 представлена карта температуры по объему заготовки в процессе прессования.

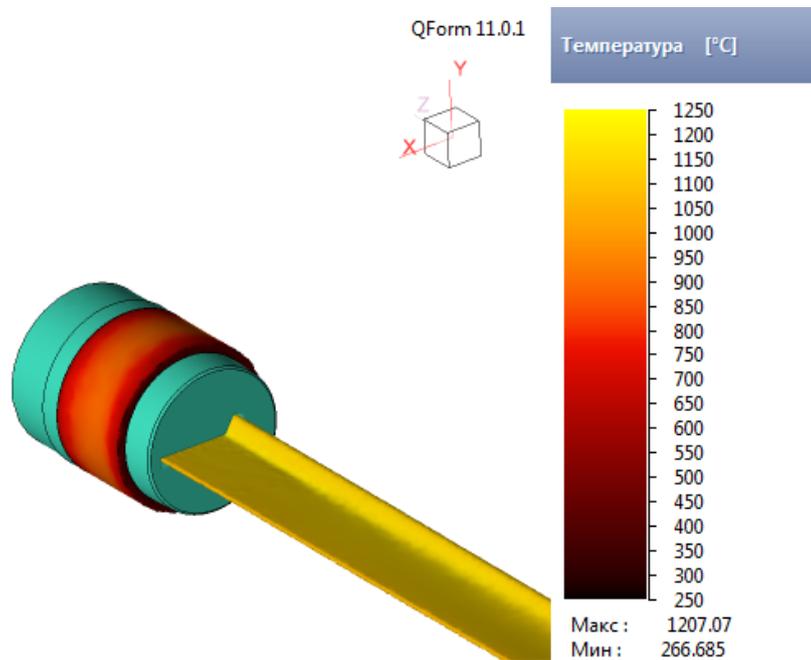


Рисунок – 19. Температура по объему заготовки

## 4 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

### 4.1 Общая характеристика прессового инструмента

Весь прессовый инструмент подвергают входному контролю службой инструментального производства цеха. Переходные корпуса матриц перед сборкой очищаются пескоструйной обработкой от загрязнений и окалины, после чего контролируются на отсутствие дефектов и соответствие чертежу. С целью избежания прилипания металла к рабочей поверхности инструмента, матрицы покрываются теплозащитным рабочим слоем диоксида циркония. Напыление производится с помощью плазменной установки.

Для прессования тонкостенных профилей из титановых сплавов в качестве исходной заготовки используют заготовку, размеры и качество поверхности которой должны соответствовать требованиям.

Схема сборки инструмента представлена в приложении Е. Спецификация для схемы сборки приведена в приложении Ж.

Контейнер является приемником заготовки и в процессе прессования он воспринимает полное давление со стороны прессуемого металла в условиях интенсивного трения при высокой температуре.

Разборная матрица из сплава 4Х5МФС из двух частей является наиболее ответственной и подверженной износу частью инструмента. Она используется для обеспечения геометрических размеров и качества поверхности получаемого изделия. Корпус матрицы также из сплава 4Х5МФС предназначен для предупреждения раздвижения отдельных частей матрицы, что позволяет обеспечить более высокую точность размеров профилей. Матрица, используемая для изготовления профиля марки ПТ14-8, приведена на рисунке 20.

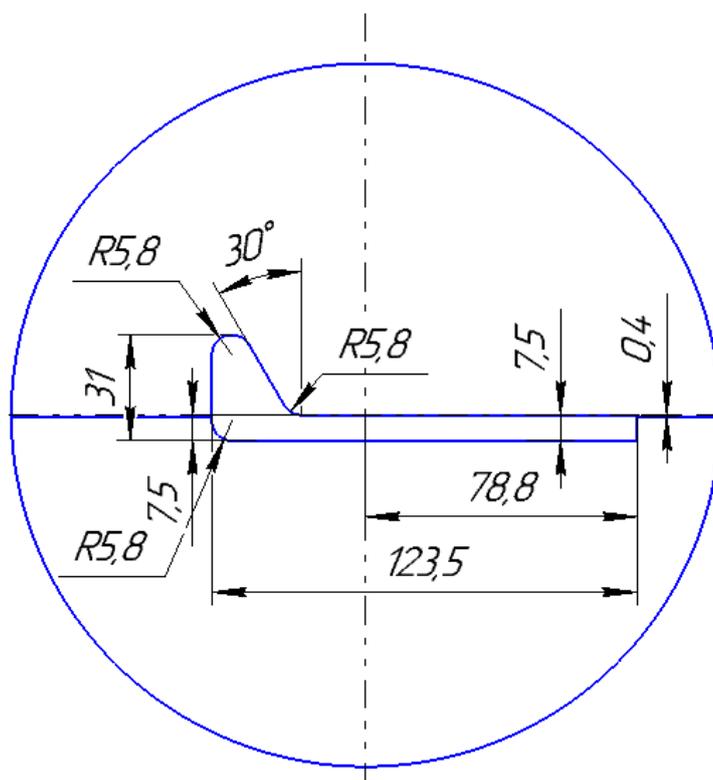


Рисунок – 20. Матрица для изготовления профиля ПТ14-8

Пресс-штемпель сплошного типа передает усилие от главного цилиндра к прессуемому металлу и воспринимает полную нагрузку от давления прессования. Для предохранения торца пресс-штемпеля от контакта с нагретой заготовкой используют сменные пресс-шайбы, которые не скреплены с пресс-штемпелем, а после каждого цикла прессования удаляются из контейнера вместе с пресс-остатком. Использование пресс-шайбы также позволяет сэкономить металл с утяжинного конца. Труба направляющая предназначена для предупреждения искривления профиля.

Для изготовления полособульбового профиля из заготовки  $\text{Ø}220$  мм используется контейнер  $\text{Ø}230$  мм. Комплект необходимого для прессования инструмента прессы 31,5 МН при данном размере контейнера входит набор деталей, указанный в таблице 13 [6].

Таблица 13 – Комплект инструмента прессы усилием 31,5 МН при прессовании профиля марки ПТ14-8 из сплава ПТ-3В

Наименование детали	Размер, мм
Контейнер	$\varnothing 230^{\pm 0,1}$ Длина $1000^{+2,6}$
Пресс-шайба для профилей и прутков	$\varnothing 229,6^{-0,1/-0,2}$ Длина $100^{+0,25}$
Пресс-штемпель Максимальное давление в главном цилиндре прессы, кгс/см <sup>2</sup>	$\varnothing 225^{\pm 0,1}$ Длина $1570^{-2,8}$ 320
Матрица	Комплектуется индивидуально, по наружному размеру и конфигурации изделия, по диаметру контейнера и по схеме сборки инструмента.
Прокладка	Наружный диаметр, длина, конфигурация и размер отверстия по размеру и конфигурации прессуемого изделия.
Матрицедержатель	$\varnothing 535^{-0,5}$ $\varnothing_{\text{отверстия под матрицу}} = 240,3^{\pm 0,1}$ Длина $150^{-0,25}$
Опорное кольцо	Наружный диаметр $539^{-0,2}$ , внутренний диаметр под направляющие трубы различных диаметров в зависимости от прессуемого изделия.
Направляющая труба	Наружный диаметр по диаметру опорного кольца, внутренний диаметр индивидуально для каждого изделия по наружному диаметру изделия.

Процесс горячего прессования изделий из титана и его сплавов более сложен, чем прессования алюминиевых, медных сплавов и даже стали. Это обусловлено особенностями физико-химических свойств титановых сплавов. Низкая теплопроводность титановых заготовок при их горячем прессовании приводит к существенной разнице температур поверхностных и внутренних слоев. Совместное влияние упрочнения от газонасыщения и значительного

перепада температур по сечению заготовки вызывает резкое различие прочностных и пластических характеристик металла на поверхности и в центре заготовки. В процессе прессования это может приводить к большой неравномерности деформации, значительным дополнительным растягивающим напряжениям в поверхностных слоях и служить причиной образования надрывов и трещин на поверхности пресс-изделий.

#### **4.2 Эксплуатация прессового инструмента**

Матрицы перед прессованием должны быть просушены в сушильном шкафу при температуре 200°C, время просушки должно быть не менее 60 минут. Перед прессованием профилей втулка контейнера должна быть нагрета до температуры от 400°C до 420°C [1].

Производится сборка матричного узла согласно утвержденным чертежам на сборку инструмента, и, при помощи консольного крана, матричный узел устанавливается в гнездо инструментальной доски. При установке производится контроль сохранности напыленного слоя и соответствие матрицы прессуемому изделию.

Инструментальная доска устанавливается в рабочее положение, поверхность втулки очищается от налипов металла и стеклографитной смазки при помощи шайбы для чистки втулки прессы 31,5 МН. При прессовании тонкостенных профилей производится очистка втулки контейнера перед прессованием первой заготовки в следующей последовательности:

- 1) при помощи клещей шайба устанавливается на податчик заготовок прессы усилием 31,5 МН,
- 2) шайба поднимается податчиком на ось прессования, после чего устанавливается пресс-штемпелем во втулку контейнера за уровень входного конуса, после чего опускается податчик и отводится пресс-штемпель,
- 3) контейнер прижимается к освобожденному от матрицедержателя гнезду инструментальной доски; через отверстие втулки контейнера проталкивается шайба,

4) после прессования каждого последующего профиля визуально контролируется чистота поверхности втулки контейнера. При необходимости проводится очистка.

Матрица вручную устанавливается в корпус матрицы (кольцо), фигура очка матрицы совмещается с фигурой подставки.

При смене контейнера, изменении вида, размера прессуемого изделия проводится визуальный осмотр втулки контейнера на наличие дефектов поверхности. Допустимая глубина выработки втулки контейнера составляет 1,5 мм. Измерение проводится на цилиндрической части поверхности по всей длине втулки контейнера. В случае обнаружения налипов металла, выработки более допустимой и трещин дальнейшее использование втулки для прессования не допускается.

### 4.3 Расчет деталей прессовой установки на прочность

При расчете деталей на прочность используется методика, описанная В.А. Лебедевым и С.В. Харитониным в работе [14].

#### 1) Расчет главного цилиндра

Гидроцилиндры – это исполнительные механизмы гидравлических прессов, иначе называемые гидродвигателями поступательного движения. Однослойный цилиндр допустимо рассматривать как толстостенную трубу [15], на которую изнутри действует высокое давление жидкости, снаружи – атмосферное давление воздуха, и рассчитывать по формулам Ляме.

Радиальные напряжения:

$$\sigma_r = \frac{p_2 R_B^2 - p_1 R_H^2}{R_H^2 - R_B^2} - \frac{(p_2 - p_1) R_B^2 R_H^2}{(R_H^2 - R_B^2) r_x^2}, \quad (26)$$

тангенциальные:

$$\sigma_\tau = \frac{p_2 R_B^2 - p_1 R_H^2}{R_H^2 - R_B^2} + \frac{(p_2 - p_1) R_B^2 R_H^2}{(R_H^2 - R_B^2) r_x^2}, \quad (27)$$

где  $p_2$  – давление жидкости в цилиндре, МПа;

$R_B$  – внутренний радиус цилиндра, м;

$p_1 = 0,1$  МПа – атмосферное давление;

$R_H$  – наружный радиус цилиндра, м;

$r_x$  – текущий радиус цилиндра, м.

Если исключить из расчета атмосферное давление в связи с его пренебрежимо малой величиной, то приведенные выше формулы можно записать в следующем виде [14]:

Радиальные напряжения:

$$\sigma_r = \frac{p_2 R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \left( 1 - \frac{R_H^2}{r_x^2} \right), \quad (28)$$

тангенциальные:

$$\sigma_\tau = \frac{p_2 R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \left( 1 + \frac{R_H^2}{r_x^2} \right). \quad (29)$$

Изменяя величину текущего радиуса  $r_x$ , можно определить величину напряжений на внутренней и наружной стенках цилиндра.

Осевые напряжения:

$$\sigma_z = \frac{p_2 R_B^2}{R_H^2 - R_B^2}. \quad (30)$$

Эквивалентное напряжение определяется по формуле:

$$\sigma_\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\tau - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\tau)^2}. \quad (31)$$

При рабочих давлениях менее 50 МПа расчет можно упростить, определив эквивалентное напряжение на внутренней поверхности цилиндра по формуле:

$$\sigma_\sigma = \frac{\sqrt{3} R_H^2 p}{R_H^2 - R_B^2}. \quad (32)$$

При  $R_B = 1320$  мм и  $R_H = 1730$  мм эквивалентное напряжение равно:

$$\sigma_\sigma = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,73^2 \cdot 31,3}{1,73^2 - 1,32^2} = 129 \text{ МПа.}$$

Примем  $[\sigma] = 200$  МПа согласно рекомендациям [16] при коэффициенте прочности  $[n] = 2,2$ . Таким образом, главный цилиндр удовлетворяет условию прочности.

## 2) Расчет плунжера

Плунжер рассчитывается по формуле [14]:

$$\sigma = \frac{P}{F}, \quad (33)$$

где  $\sigma$  – напряжение сжатия, возникающее в плунжере, МПа;

$P$  – максимальное передаваемое плунжером усилие, МН;

$F$  – площадь поперечного сечения плунжера.

От давления жидкости возникают сжимающие осевые, а также радиальные и тангенциальные напряжения, которые можно определить по формулам:

Осевые напряжения:

$$\sigma_z = \frac{p_2 R_B^2}{R_H^2 - R_B^2}; \quad (34)$$

радиальные напряжения:

$$\sigma_r = \frac{p_2 R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \left( 1 - \frac{R_H^2}{r_x^2} \right); \quad (35)$$

тангенциальные:

$$\sigma_\tau = \frac{p_2 R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \left( 1 + \frac{R_H^2}{r_x^2} \right), \quad (36)$$

где  $p_2$  – давление жидкости в цилиндре, МПа;

$R_B$  – внутренний радиус цилиндра, м;

$R_H$  – наружный радиус цилиндра, м;

$r_x$  – текущий радиус, м.

Опасные напряжения возникают на внутренней поверхности плунжера при  $r = R_B$ . Далее рассчитывается эквивалентное напряжение по формуле:

$$\sigma_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\tau - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\tau)^2}. \quad (37)$$

Допускаемый коэффициент запаса прочности принимаем  $[n] = 1,5$ . Для плунжера получим:

Осевые напряжения:

$$\sigma_z = \frac{0,42^2 \cdot 31,3}{0,42^2 - 0,24^2} = -15,18 \text{ МПа};$$

радиальные напряжения:

$$\sigma_r = \frac{0,42^2 \cdot 31,3}{0,42^2 - 0,24^2} \cdot \left(1 - \frac{0,42}{0,24}\right) = 31,3 \text{ МПа};$$

тангенциальные напряжения:

$$\sigma_\tau = \frac{0,42^2 \cdot 31,3}{0,42^2 - 0,24^2} \cdot \left(1 + \frac{0,42}{0,24}\right) = 127,16 \text{ МПа}.$$

Эквивалентное напряжение составит:

$$\sigma_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(127,16 + 15,18)^2 + (-15,18 - 31,3)^2 + (31,3 - 127,16)^2} = 125,71 \text{ МПа}.$$

Примем  $\sigma_{02} = 300$  МПа. С учетом рекомендуемого [16] коэффициента запаса прочности  $[n] = 1,5$ , допускаемое напряжение будет равно

$$[\sigma] = 300/1,5 = 200 \text{ МПа}.$$

Следовательно, главный плунжер удовлетворяет условию прочности.

### 3) Расчет неподвижной поперечины

Изгибающий момент в опасном сечении, совпадающем с осью цилиндра, рассчитывается по формуле

$$M = \frac{P_n}{2} \left( \frac{L}{2} - \frac{D}{\pi} \right), \quad (38)$$

где  $L$  – длина поперечины, равная 1,45 м;

$D$  – диаметр опорного бурта цилиндра, равный 0,5 м.

Изгибающий момент равен:

$$M = \frac{31,5}{2} \left( \frac{1,45}{2} - \frac{0,5}{\pi} \right) = 8,91 \text{ МН}.$$

Момент сопротивления поперечины изгибу рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{h \cdot b^2 \cdot 20,05^2}{6}, \quad (39)$$

где  $h$  – высота сечения поперечины, м,  $h = 3,1$  м;

$b$  – ширина сечения поперечины,  $b = 1,45$  м.

Момент сопротивления составляет:

$$W = \frac{3,1 \cdot 1,45^2 \cdot 20,05^2}{6} = 436,69 \text{ м}^3.$$

Напряжение изгиба в опасном сечении равно:

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad (40)$$

$$\sigma = \frac{8,91}{436,69} = 0,02 \text{ МПа.}$$

Полученное значение напряжения изгиба ниже допускаемого напряжения  $[\sigma] = 50 \dots 70$  МПа. Условие прочности выполняется.

#### 4) Расчет колонны

Пресс оснащен тремя колоннами, соединяющими главный цилиндр и матричную плиту, имеющими предварительное натяжение вдоль всей их длины, сокращающее удлинение и упругую деформацию прессы во время прессования.

В колоннах действуют напряжения растяжения. Растягивающее усилие  $P_p$ , действующее на одну колонну трехколонного прессы номинальным усилием, определяется по формуле:

$$P_p = \frac{P}{3}. \quad (41)$$

Тогда, при  $P = 31,5$  МН:

$$P_p = \frac{31,5}{3} = 10,5 \text{ МН.}$$

Величина действующих напряжений в колонне диаметром  $d_k = 440$  мм определяется по формуле:

$$\sigma_p = \frac{4P_p}{\pi d_k^2}. \quad (42)$$

Тогда, при  $P_p = 10,5$  МН;  $d_k = 0,44$  м, величина действующих напряжений равна:

$$\sigma_p = \frac{3 \cdot 10,5}{\pi \cdot 0,44^2} = 50,97 \text{ МПа.}$$

Согласно рекомендациям, примем допускаемое напряжение  $[\sigma] = 120$  МПа. Условие прочности для колонн выполняется.

### 5) Расчет гайки

Резьбу гайки рассчитывают на смятие, изгиб и срез [17]. На каждый виток гайки действует усилие:

$$P_r = \frac{P}{nz}, \quad (43)$$

где  $P$  – номинальное усилие прессы, МН;

$n$  – число колонн;

$z$  – число витков резьбы гайки, равное 30.

$$P_r = \frac{31,5}{3 \cdot 30} = 0,35 \text{ МН.}$$

Напряжения смятия резьбы гайки рассчитываются по формуле:

$$\sigma_{см} = \frac{4P_z}{\pi(d_n^2 - d_b^2)}, \quad (44)$$

где  $d_n$  – наружный диаметр резьбы, мм,

$d_b$  – внутренний диаметр резьбы, мм.

В соответствии с ГОСТ 10177-82 примем  $d_n = 440$  мм,  $d_b = 408$  мм. Тогда напряжение смятия гайки будет равно

$$\sigma_{см} = \frac{4 \cdot 0,35}{3,14 \cdot (0,440^2 - 0,408^2)} = 13,55 \text{ МПа.}$$

Напряжения изгиба в резьбе определяются по формуле

$$\sigma_{и} = \frac{M_{и}}{W_{и}}, \quad (45)$$

где  $M_{и}$  – изгибающий момент, Н·м;

$W_{и}$  – момент сопротивления изгибу, м<sup>3</sup>.

Изгибающий момент определяется по формуле:

$$M_{\text{и}} = \frac{P_{\text{г}}(d_{\text{н}} - d_{\text{в}})}{4}. \quad (46)$$

Момент сопротивления изгибу определяется по формуле:

$$W_{\text{и}} = \frac{\pi d_{\text{н}} B^2}{6}. \quad (47)$$

Следовательно

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{1,5P_{\text{г}} \cdot (d_{\text{н}} - d_{\text{в}})}{\pi d_{\text{н}} B^2}, \quad (48)$$

тогда при  $P_{\text{г}} = 0,35$  МН;  $d_{\text{н}} = 0,44$  м;  $d_{\text{в}} = 0,408$  м;  $B = 0,014$  м напряжения изгиба в резьбе равны

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{1,5 \cdot 0,35 \cdot (0,44 - 0,408)}{3,14 \cdot 0,44 \cdot 0,014^2} = 51,18 \text{ МПа.}$$

Напряжения среза определяются по формуле:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{P}{\pi d_{\text{н}} B} \quad (49)$$

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{0,35}{3,14 \cdot 0,44 \cdot 0,014} = 14,93 \text{ МПа.}$$

Согласно рекомендациям [15], допускаемые напряжения рекомендуется принимать:  $[\sigma_{\text{см}}] = 80$  МПа,  $[\sigma_{\text{и}}] = 80$  МПа,  $[\tau_{\text{ср}}] = 55$  МПа. Все условия прочности выполняются.

#### 4.4 Расчет деталей прессовой наладки на прочность

Расчеты элементов прессовой наладки на прочность проводятся по методическим материалам [18].

##### 1) Расчет контейнера

Контейнер пресса из стали 27Х2Н2МВФ служит для приема слитков, нагретых до температуры прессования; он воспринимает во время прессования давление, необходимое для деформации слитка и получения изделия заданного профиля. Контейнер – один из наиболее нагруженных узлов инструментальной наладки пресса. Поэтому его прочность обуславливает

температурно-скоростные условия процесса, лимитирует величины коэффициентов вытяжки и размеры слитка.

Рассчитываем давление металла на внутреннюю поверхность контейнера [19]:

$$p_k = (0,6 - 0,9) \frac{4P}{\pi d_1^2}, \quad (50)$$

$$p_k = (0,6 - 0,9) \frac{4 \cdot 30,891}{\pi \cdot 0,28^2} = (302,1 - 453,1) \text{ МПа.}$$

Примем  $p_k = 453,1$  МПа.

Выбираем величину относительных натягов для скрепления втулок: Принимаем натяг скрепления рабочей втулки с контейнером  $(2\delta/d_c) = 0,006$ . Определяем температуру нагрева втулки для обеспечения сборки с выбранным натягом по формуле:

$$\Delta t = \frac{2\delta}{d_c} \cdot \frac{1}{\alpha} + (100 - 150), \quad (51)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала наружной втулки ( $\alpha \approx 12,5 \cdot 10^{-6}$  1/град).

$$\Delta t = 0,006 \cdot \frac{1}{12,5 \cdot 10^{-6}} + (100 - 150) = 148 - 198^\circ\text{C.}$$

Расчетные значения температуры нагрева втулок не превышают предельного значения в  $500^\circ\text{C}$ . Рассчитаем контактные давления на поверхностях сопряжения втулки после ее горячей сборки по формуле:

$$q_i = \frac{2E_i E_{i+1}}{E_i + E_{i+1}} \cdot \frac{2\delta}{d_{ci}} \cdot \frac{(d_{i+1}^2 - d_{ci}^2)(d_{ci}^2 - d_i^2)}{2d_{ci}^2 (d_{i+1}^2 - d_i^2)}, \quad (52)$$

где  $E_i$  и  $E_{i+1}$  – модули упругости материала рабочей втулки и контейнера, которые с достаточной точностью можно принимать  $E_i \approx E_{i+1} = 2,15 \cdot 10^5$  МПа;

$d_i$  – внутренний диаметр внутренней втулки, мм;

$d_{ci}$  – диаметр сопряжения  $i$ -й и  $i+1$ -й втулок, мм;

$d_{i+1}$  – наружный диаметр внешней втулки, мм.

$$q_1 = \frac{2 \cdot (2,15 \cdot 10^5)^2}{2 \cdot 2,15 \cdot 10^5} \cdot 0,012 \cdot \frac{(1,8^2 - 0,6^2)(0,6^2 - 0,28^2)}{2 \cdot 0,6^2(1,8^2 - 0,28^2)} = 91,9 \text{ МПа.}$$

Под действием давления  $p_k$  и  $q_i$  в каждом элементарном объеме многослойного контейнера возникают сжимающие радиальные  $\sigma_r$  и растягивающие тангенциальные  $\sigma_\tau$  напряжения, а также продольные сжимающие напряжения, величиной которых пренебрегают. Напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\tau$  определяют по формулам Ляме:

$$\sigma_\tau = \frac{p_B d_B^2 - p_H d_H^2}{d_H^2 - d_B^2} + \frac{(p_B - p_H) d_B^2 d_H^2}{(d_H^2 - d_B^2) d_x^2}, \quad (53)$$

$$\sigma_r = \frac{p_B d_B^2 - p_H d_H^2}{d_H^2 - d_B^2} - \frac{(p_B - p_H) d_B^2 d_H^2}{(d_H^2 - d_B^2) d_x^2}, \quad (54)$$

где  $d_x$  – диаметр точки контейнера, в которой определяются напряжения, мм;

$p_B$  – внутреннее давление на втулку, МПа;

$p_H$  – наружное давление на втулку, МПа;

$d_B$  – внутренний диаметр втулки, мм;

$d_H$  – внутренний диаметр втулки, мм.

Для каждой  $i$ -ой втулки внутренними давлениями являются давление металла  $p_k$  и давления натягов  $q_i, q_{i+1}, \dots$  всех собранных внешних втулок. При расчете  $\sigma_r$  и  $\sigma_\tau$  используют принцип суперпозиции (суммирования напряжений). Сначала для каждого диаметра  $d_x$  сопряжения втулок определяют суммарные радиальные  $\sigma_r^{pB}$  и тангенциальные  $\sigma_\tau^{pB}$  напряжения от действия каждого  $i$ -го внутреннего давления  $p_{Bi}$  при условии, что все наружные давления на втулку отсутствуют ( $p_H = 0$ ). В этом случае приведенные выше формулы имеют вид:

$$\sigma_\tau^{pB} = \left( 1 + \frac{d_n^2}{d_x^2} \right) \sum_{i=1}^n \frac{p_{Bi} d_{Bi}^2}{d_n^2 - d_{Bi}^2}, \quad (55)$$

$$\sigma_r^{pB} = \left( 1 - \frac{d_n^2}{d_x^2} \right) \sum_{i=1}^n \frac{p_{Bi} d_{Bi}^2}{d_n^2 - d_{Bi}^2}, \quad (56)$$

где  $d_n$  – наружный диаметр контейнера, мм;

$p_{vi}$  – величина  $i$ -го внутреннего давления, действующего на диаметре  $d_{vi}$ , мм.

Затем для каждого диаметра  $d_x$  определяют суммарные тангенциальные  $\sigma_\tau^{PB}$  и радиальные  $\sigma_r^{PB}$  напряжения от действия всех наружных давлений  $p_{Hj}$  при условии, что все внутренние давления  $p_{vi} = 0$ . При этом следует:

$$\sigma_\tau^{PB} = -\left(1 + \frac{d_1^2}{d_x^2}\right) \sum_{j=n-1}^n \frac{p_{Hj} d_{Hj}^2}{d_n^2 - d_1^2}, \quad (57)$$

$$\sigma_r^{PB} = -\left(1 - \frac{d_1^2}{d_x^2}\right) \sum_{j=n-1}^n \frac{p_{Hj} d_{Hj}^2}{d_n^2 - d_1^2}, \quad (58)$$

где  $d_1$  – внутренний диаметр контейнера, мм;

$p_{Hj}$  – величина  $j$ -го наружного давления, действующего на диаметре  $d_{Hj}$ , МПа.

Результирующие тангенциальные  $\sigma_\tau$  и радиальные  $\sigma_r$  напряжения рассчитывают алгебраическим суммированием напряжений, найденных соответственно по приведенным выше формулам:  $\sigma_\tau = \sigma_\tau^{PB} + \sigma_\tau^{PH}$  и  $\sigma_r = \sigma_r^{PB} + \sigma_r^{PH}$ .

Эквивалентные напряжения на поверхности сопряжения втулок определяют по четвертой (энергетической) теории прочности для плоского напряженного состояния.

$$\sigma_{\text{эkv}} = \sqrt{\sigma_\tau^2 + \sigma_r^2 - \sigma_\tau \sigma_r}. \quad (59)$$

После определения эквивалентных напряжений на всех диаметрах многослойного контейнера их максимальную величину  $\sigma_{\text{эkv.max.i}}$  для каждой втулки сравнивают с условным пределом текучести  $\sigma_{02i}$  стали, из которой изготовлена втулка, при рабочей температуре контейнера, определяя коэффициент запаса прочности для каждой  $i$ -й втулки.

$$n_i = \frac{\sigma_{02i}}{\sigma_{\text{эkv.max.i}}}. \quad (60)$$

Проверяют выполнение условия прочности  $n = \frac{\sigma_B}{\sigma} \geq [n]$ , принимая величину допустимого коэффициента запаса прочности  $[n] = 1,3-2,0$ . При этом целесообразно, чтобы все втулки были равнопрочными.

Рабочая втулка:

Внутренняя поверхность при  $d_x = 0,28$  м:

Напряжения от действия внутреннего давления  $p_{в1} = p_k$  ( $d_n = 1,8$  м,  $d_{в1} = 0,28$  м) при  $p_{нj} = 0$ :

Тангенциальные:

$$\sigma_{\tau}^{pB} = \left(1 + \frac{1,8^2}{0,28^2}\right) \cdot \frac{453,1 \cdot 0,28^2}{1,8^2 - 0,28^2} = 475,58 \text{ МПа};$$

Радиальные:

$$\sigma_r^{pB} = \left(1 - \frac{1,8^2}{0,28^2}\right) \cdot \frac{453,1 \cdot 0,28^2}{1,8^2 - 0,28^2} = -453,10 \text{ МПа};$$

Напряжения от действия наружных давлений  $p_{н1} = q_1$  и  $p_{н2} = q_2$  ( $d_{н1} = 0,6$ ,  $d_{н2} = 1,8$  м,  $d_1 = 0,28$  м) при  $p_{вi} = 0$ :

Тангенциальные:

$$\sigma_{\tau}^{pH} = \left(1 + \frac{0,28^2}{0,28^2}\right) \cdot \frac{91,9 \cdot 0,6^2}{0,6^2 - 0,28^2} = -235,02 \text{ МПа};$$

Радиальные:

$$\sigma_r^{pH} = \left(1 - \frac{0,28^2}{0,28^2}\right) \cdot \frac{91,9 \cdot 0,6^2}{0,6^2 - 0,28^2} = 0 \text{ МПа};$$

Результирующие тангенциальные и радиальные напряжения:

$$\sigma_{\tau} = 475,58 - 235,02 = 240,56 \text{ МПа}, \quad \sigma_r = -453,1 - 0 = -453,1 \text{ МПа},$$

Эквивалентные напряжения на данной поверхности:

$$\sigma_{\text{эkv}} = \sqrt{240,56^2 + (-453,1)^2} = 510,05 \text{ МПа}.$$

Внешняя поверхность при  $d_x = 0,6$  м:

Напряжения от действия внутреннего давления  $p_{в1} = p_k$  ( $d_n = 1,8$  м,  $d_{в1} = 0,28$  м) при  $p_{нj} = 0$ :

Тангенциальные:

$$\sigma_{\tau}^{pH} = \left(1 + \frac{1,8^2}{0,6^2}\right) \cdot \frac{453,1 \cdot 0,28^2}{1,8^2 - 0,28^2} = 112,36 \text{ МПа};$$

Радиальные:

$$\sigma_r^{pH} = \left(1 - \frac{1,8^2}{0,6^2}\right) \cdot \frac{453,1 \cdot 0,28^2}{1,8^2 - 0,28^2} = -89,89 \text{ МПа};$$

Напряжения от действия наружных давлений  $p_{H1} = q_1$  и  $p_{H2} = q_2$  ( $d_{H1} = 0,6$ ,  $d_{H2} = 1,8$  м,  $d_1 = 0,28$  м) при  $p_{Bi} = 0$ :

$$\sigma_{\tau}^{pH} = \left(1 + \frac{0,28^2}{0,6^2}\right) \cdot \frac{91,9 \cdot 0,6^2}{0,6^2 - 0,28^2} = -143,10 \text{ МПа};$$

$$\sigma_r^{pH} = \left(1 - \frac{0,28^2}{0,6^2}\right) \cdot \frac{91,9 \cdot 0,6^2}{0,6^2 - 0,28^2} = -91,92 \text{ МПа};$$

Результирующие тангенциальные и радиальные напряжения:

$$\sigma_{\tau} = 112,36 - 143,10 = -30,74 \text{ МПа}, \quad \sigma_r = -89,89 + (-91,92) = -181,81 \text{ МПа},$$

Эквивалентные напряжения на данной поверхности:

$$\sigma_{\text{эKB}} = \sqrt{(-30,74)^2 + (-181,81)^2 - (-30,74) \cdot (-181,81)} = 168,56 \text{ МПа}.$$

Контейнер:

Внутренняя поверхность при  $d_x = 0,6$  м:

Напряжения от действия внутреннего давления  $p_{B1} = p_k$ ,  $p_{B2} = q_1$  ( $d_n = 1,8$  м,  $d_{B1} = 0,28$  м,  $d_{B2} = 0,6$  м) при  $p_{Hj} = 0$ :

Тангенциальные:

$$\sigma_{\tau}^{pB} = \left(1 + \frac{1,8^2}{0,6^2}\right) \cdot \left(\frac{453,1 \cdot 0,28^2}{1,8^2 - 0,28^2} + \frac{91,9 \cdot 0,6^2}{1,8^2 - 0,6^2}\right) = 227,26 \text{ МПа};$$

Радиальные:

$$\sigma_r^{pB} = \left(1 - \frac{1,8^2}{0,6^2}\right) \cdot \left(\frac{453,1 \cdot 0,28^2}{1,8^2 - 0,28^2} + \frac{91,9 \cdot 0,6^2}{1,8^2 - 0,6^2}\right) = -181,81 \text{ МПа};$$

Поскольку наружных давлений на данной поверхности нет, то тангенциальные напряжения  $\sigma_{\tau}^{pB} = 0$  МПа, а радиальные напряжения  $\sigma_r^{pH} = 0$  МПа.

Результирующие тангенциальные и радиальные напряжения:

$$\sigma_{\tau} = 227,26 - 0 = 227,26 \text{ МПа}, \quad \sigma_r = -181,81 - 0 = -181,81 \text{ МПа},$$

Эквивалентные напряжения на данной поверхности:

$$\sigma_{\text{эKB}} = \sqrt{227,26^2 + (-181,81)^2 - 227,26 \cdot (-181,81)} = 354,99 \text{ МПа.}$$

Внешняя поверхность при  $d_x = 1,8$  м:

Напряжения от действия внутреннего давления  $p_{в1} = p_k$ ,  $p_{в2} = q_1$  и  $p_{в3} = q_2$  ( $d_n = 1,8$  м,  $d_{в1} = 0,28$  м,  $d_{в2} = 0,6$  м) при  $p_{нj} = 0$ :

Тангенциальные:

$$\sigma_{\tau}^{PB} = \left(1 + \frac{1,8^2}{1,8^2}\right) \cdot \left(\frac{453,1 \cdot 0,28^2}{1,8^2 - 0,28^2} + \frac{91,9 \cdot 0,6^2}{1,8^2 - 0,6^2}\right) = 45,45 \text{ МПа;}$$

Радиальные:

$$\sigma_r^{PB} = \left(1 - \frac{1,8^2}{1,8^2}\right) \cdot \left(\frac{453,1 \cdot 0,28^2}{1,8^2 - 0,28^2} + \frac{91,9 \cdot 0,6^2}{1,8^2 - 0,6^2}\right) = 0 \text{ МПа;}$$

Поскольку наружных давлений на данной поверхности нет, то тангенциальные напряжения  $\sigma_{\tau}^{PB} = 0$  МПа, а радиальные напряжения  $\sigma_r^{PB} = 0$  МПа.

Результирующие тангенциальные и радиальные напряжения:

$$\sigma_{\tau} = 45,45 - 0 = 45,45 \text{ МПа, } \sigma_r = 0 - 0 = 0 \text{ МПа,}$$

Эквивалентные напряжения на данной поверхности:

$$\sigma_{\text{эKB}} = \sqrt{45,45^2 + 0^2 - 45,45 \cdot 0} = 45,45 \text{ МПа.}$$

Определяем для каждой втулки контейнера коэффициент запаса прочности:

Рабочая втулка:

$$n_1 = \frac{1300}{610,05} = 2,13;$$

контейнер:

$$n_2 = \frac{1300}{354,99} = 3,66.$$

Так как расчетные значения коэффициентов запаса прочности превышают допустимые  $[n] = 1,3-2,0$ , условие прочности  $n = \frac{\sigma_B}{\sigma} \geq [n]$  выполняется для всех втулок контейнера.



Радиус инерции рассчитывают по формуле

$$i_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{F}}, \quad (62)$$

где  $F$  – площадь сечения пресс-штемпеля,  $\text{м}^2$ ;

$J_{min}$  – наименьший момент инерции поперечного сечения пресс-штемпеля,  $\text{м}^4$ .

Данные параметры пресс-штемпеля сплошного круглого сечения определяются по формулам:

$$F = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,225^2}{4} = 0,0398 \text{ м}^2;$$

$$J_{min} = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{\pi \cdot 0,225^4}{64} = 0,0001258 \text{ м}^4.$$

Следовательно, радиус инерции равен

$$i_{min} = \sqrt{\frac{0,0001258}{0,0398}} = 0,05625 \text{ м}.$$

В таком случае гибкость пресс-штемпеля будет равна

$$\lambda = \frac{2 \cdot 1,12}{0,05625} = 39,8.$$

Расчет на прочность при приложении силы прессования вдоль центральной оси пресс-штемпеля проведен по методике Ю. Н. Логинова.

Условие прочности имеет вид

$$\sigma_1 \leq \varphi[\sigma], \quad (63)$$

где  $\sigma_1$  – напряжение сжатия, МПа;

$\varphi$  – коэффициент уменьшения допускаемого напряжения сжатия  $[\sigma]$ , учитывающий гибкость пресс-штемпеля.

Напряжение сжатия рассчитывается по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{P}{F}, \quad (64)$$

тогда при  $P = 31,5$  МПа,  $F = 0,0398 \text{ м}^2$  напряжение сжатия будет равно:

$$\sigma_1 = \frac{31,5}{0,0398} = 779,66 \text{ МПа.}$$

Значения коэффициента уменьшения допускаемого напряжения сжатия  $[\sigma]$  приведены в таблице 14 [19].

Таблица 14 – Значения коэффициента уменьшения допускаемого напряжения

Гибкость $\lambda$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\varphi$	1,00	0,97	0,95	0,91	0,87	0,83	0,79	0,72	0,65	0,55	0,43

Принимаем коэффициент  $\varphi = 0,87$ .

Допускаемое напряжение определяют по формуле

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{02}}{n}, \quad (65)$$

где  $\sigma_{02}$  – условный предел текучести материала пресс-штемпеля, МПа;

$n$  – коэффициент запаса прочности, принимаемый 1,1-1,2.

Приняв предел текучести стали 4Х5МФС  $\sigma_{0,2} = 1300$  МПа, получим

$$[\sigma] = \frac{1300}{1,2} = 1083,33 \text{ МПа.} \quad (66)$$

Тогда условие прочности будет иметь вид

$$779,66 \leq 0,87 \cdot 1083,33 = 942,5 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется.

Площадь опорной части пресс-штемпеля следует проверять на смятие об опорную плиту подвижной поперечины. Для этого рассчитывают напряжения смятия по формуле

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{P}{F_{\text{оп}}} \quad (67)$$

где  $P$  – усилие пресса, МН;

$F_{\text{оп}}$  – площадь опорной поверхности хвостовой части пресс-штемпеля, равная:

$$F_{\text{оп}} = \frac{\pi D_{\text{оп}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,63^2}{4} = 0,312 \text{ м}^2.$$

Тогда:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{31,5}{0,312} = 99,45 \text{ МПа.}$$

Условие прочности имеет вид

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{см}} &\leq 200 \text{ МПа,} \\ 99,45 &\leq 200 \text{ МПа.}\end{aligned}$$

Условие прочности выполняется.

### 3) Расчет пресс-шайбы

При прессовании сплошных профилей применяют монолитные пресс-шайбы. Материал пресс-шайбы – сталь 5ХНМ:

Пресс-шайбы рассчитывают на сжатие от усилия прессования  $P$ . Напряжения сжатия определяют по формуле:

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{P}{F_{\text{пш}}}. \quad (68)$$

где  $F_{\text{пш}}$  – площадь поверхности контакта пресс-шайбы с металлом,  $\text{м}^2$ .

Тогда при  $F_{\text{пш}} = 279,6 \text{ мм}$  получим

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{31,5}{0,2796} = 110,87 \text{ МПа.}$$

Условие прочности имеет вид:

$$n = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma} \geq [n]. \quad (69)$$

Условие прочности проверяют, принимая рекомендуемый коэффициент запаса прочности  $[n] = (1,05 \div 1,10)$  от условного предела текучести материала пресс-шайбы при температуре прессования. Тогда при  $\sigma_{\text{см}} = 1000 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\text{сж}} = 110,87 \text{ МПа}$ :

$$n = \frac{1000}{110,87} = 9,02 \geq 1,10.$$

Условие прочности выполняется.

### 4) Расчет матрицы

Равнодействующая сила давления рассчитывается по формуле

$$P = \frac{P_n}{\pi \cdot \frac{d_1^2}{4}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2), \quad (70)$$

где  $D$  – наружный диаметр матрицы, равный 230 мм;

$d$  – внутренний диаметр матрицы (диаметр равновеликого круга, найденный ранее и равный 37,64 мм;

$d_1$  – диаметр контакта металла с матрицей, равный 206 мм.

Равнодействующая сила равна

$$P = \frac{31,5}{\pi \cdot \frac{0,206^2}{4}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,23^2 - 0,03764^2) = 38,216 \text{ МН.}$$

Наружный радиус окружности приложения равнодействующей силы равен

$$R_1 = 0,21 \cdot \frac{D^2 + D \cdot d_1 + d_1^2}{D + d_1}; \quad (71)$$

$$R_1 = 0,21 \cdot \frac{0,23^2 + 0,23 \cdot 0,206 + 0,206^2}{0,23 + 0,206} = 0,069 \text{ м.}$$

Внутренний радиус окружности приложения равнодействующей силы равен

$$r_1 = 0,21 \cdot \frac{D^2 + D \cdot d + d^2}{D + d}; \quad (72)$$

$$r_1 = 0,21 \cdot \frac{0,23^2 + 0,23 \cdot 0,03764 + 0,03764^2}{0,23 + 0,03764} = 0,049 \text{ м.}$$

Изгибающий момент составляет

$$M = \frac{P \cdot (R_1 - r_1)}{2 \cdot \pi}; \quad (73)$$

$$M = \frac{38,216 \cdot (0,069 - 0,049)}{2 \cdot \pi} = 0,118 \text{ Н} \cdot \text{м}^2.$$

Наибольшее напряжение изгиба в сечении матрицы рассчитывается по формуле

$$\sigma = \frac{12 \cdot M}{h^2 \cdot d \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)}, \quad (74)$$

где  $h$  – толщина матрицы, равная 47,5 мм.

Наибольшее напряжение изгиба в сечении матрицы составляет

$$\sigma = \frac{12 \cdot 0,118}{0,0475^2 \cdot 0,03764 \cdot \ln\left(\frac{0,23}{0,03764}\right)} = 435,91 \text{ МПа.}$$

Матрица изготовлена из стали 4Х5МФС, предел текучести которой  $\sigma_{0,2} = 1160$  МПа [21].

Допускаемое напряжение изгиба равно

$$[\sigma] = 1,25 \cdot \sigma_{0,2}; \quad (75)$$

$$[\sigma] = 1,25 \cdot 1160 = 1450 \text{ МПа}$$

Полученное значение напряжения изгиба в сечении матрицы  $\sigma = 435,91$  МПа ниже допускаемого значения напряжения изгиба  $[\sigma] = 1450$  МПа. Условие прочности выполняется.

Таким образом, при выполнении конструкционных расчетов на прочность при изготовлении изделия на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 31,5 МН, все рассчитанные детали прессовой установки и наладки показали достаточную прочность.

## 5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 5.1 Сетевой график выполнения ВКР

Выпускная квалификационная работа была написана с применением методов сетевого планирования и управления, что позволило целесообразно распределить время на выполнение различных этапов выполнения. Виды работ для выполнения ВКР представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Виды работ для выполнения ВКР

Номер работы	Наименование работы	Количество дней
1-2	Построение графика выполнения ВКР	1
2-3	Постановка цели и задачи ВКР	6
3-4	Анализ предметной области	2
4-6	Подбор научно-технической литературы	2
6-7	Изучение литературных источников для выполнения ВКР	12
7-12	Консультация с инженерами-технологами	3
3-5	Описание технических условий проектируемого изделия	7
5-8	Постановка задачи для технологических расчетов	1
8-12	Выполнение технологических расчетов	7
5-9	Постановка задачи моделирования	1
9-13	Подготовка рабочего места с ПО QForm	3
13-16	Выполнение моделирования	14
16-17	Анализ результатов моделирования	14
5-10	Постановка задачи конструкторской части	1
10-14	Выполнение расчетов конструкторской части	7
5-11	Постановка задачи экономической части	1
11-15	Выполнение экономической части	2
15-18 14-18 17-18	Оформление пояснительной записки	21
18-19	Оформление графической части и презентации	7
19-20	Обсуждение выпускной квалификационной работы с руководителем	1

Номер работы	Наименование работы	Количество дней
20-21	Внесение изменений в пояснительную записку	5
21-22	Получение рецензии на выпускную квалификационную работу	1
22-23	Защита выпускной квалификационной работы	1

Сетевой график работ представлен на рисунке 23.

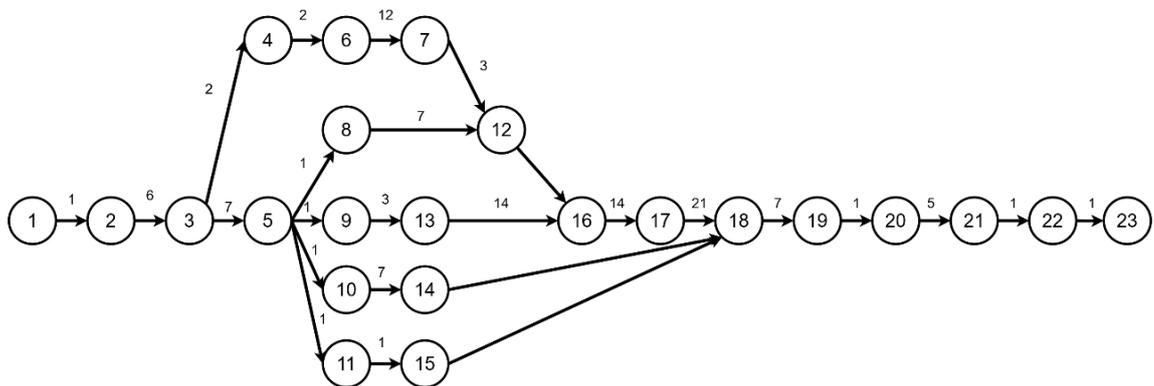


Рисунок – 23. Сетевой график выполнения работ

Все вышеупомянутые работы являются критическими, следовательно критический путь составит в сумме 120 дней.

## 5.2 Смета затрат на выполнение ВКР

Смета затрат включает в себя материальные расходы, расходы на заработную плату, амортизацию основных фондов, а также прочие денежные затраты.

Материальные расходы представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Материальные расходы на выполнение ВКР

Наименование	Количество, шт	Стоимость, руб	Сумма, руб
Печать листов А4, черно-белая	70	10	700
Печать листов А4, цветная	10	20	200
Печать листов А1, черно-белая	6	280	1680

Для написания выпускной квалификационной работы и проведения моделирования на предприятии ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» было организовано рабочее место с установленными пакетами программного обеспечения QForm, КОМПАС-3D, SolidWorks. Расходы на электроэнергию, использованную при работе над пояснительной запиской, а также стоимость лицензий ПО на одно рабочее место не учитываются в рамках сметы затрат. Соответственно, не будут учитываться также и амортизация основных фондов.

Расходы на заработную плату консультантов рассчитывают по формуле:

$$Z_T = T_K \cdot T_{TC}, \quad (76)$$

где  $T_K$  – время занятости по теме, час;

$T_{TC}$  – часовая тарифная ставка, руб/час.

При выплате заработной платы сотрудникам, работодатель обязан оплачивать страховые взносы, зависящие не только от выплаты работнику, но и от ставки на страховые взносы.

Тарифы отчисления на страховые взносы в 2024 году составляют 22% на пенсионный фонд, 2,9% – на фонд социального страхования, 5,1% – на фонд медицинского страхования.

Общий итог отчисления с заработной платы на страховые взносы составляет 30%.

Итоги начисления заработной платы приведены в таблице 17.

Таблица 17 – Начисление заработной платы

Должность	Часовая тарифная ставка, руб/час	Время выполнения работы, час	Расходы на заработную плату, руб	Отчисления на страховые взносы, руб	Итог заработной платы, руб
Студент	4900 в месяц	4 месяца	19600	-	19600
Руководитель ВКР	500	15	7500	2250	9750

Должность	Часовая тарифная ставка, руб/час	Время выполнения работы, час	Расходы на заработную плату, руб	Отчисления на страховые взносы, руб	Итого заработной платы, руб
Консультант по экономической части	500	3	1500	500	2000
Нормоконтролер	500	3	1500	500	2000
Рецензент	1200	1	1200	400	1600
Итого			31300	3650	34950

Остальные денежные затраты включают в себя накладные расходы, составляющие 15% от прямых затрат.

Смета затрат для выполнения выпускной квалификационной работе представлена в таблице 18.

Таблица 18 – Смета затрат на выполнение ВКР

Наименование	Сумма, руб
Материальные расходы	3280
Расходы на заработную плату	31300
Отчисления на страховые взносы	3650
Всего	38230
Накладные расходы 15%	5734,5
Итого	43964,5

Таким образом общие расходы на выполнение выпускной квалификационной работы составили 43964 рубля 50 копеек.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе рассмотрена технология производства полособульбового профиля из титанового сплава ПТ-3В методом прямого прессования на гидравлическом горизонтальном прессе усилием 31,5 МН.

Рассмотрены необходимые требования к геометрии и механическим свойствам изделия, приведена характеристика обрабатываемого сплава и описаны возможные причины возникновения брака. Проведены технологические расчеты размеров используемой заготовки, размеров рабочего канала матрицы и калибрующего пояска, а также изменения температуры в процессе прессования. Было рассчитано также полное усилие прессования.

Проведено моделирование двух процессов прессования рассматриваемого изделия в программном комплексе QForm с применением двух различных методик расчета калибрующего пояска, в одной из которых было выявлено возникновение дефекта, связанного с неоптимальным проектированием калибрующего пояска матрицы.

Были выполнены конструкционные расчеты на прочность при изготовлении изделия на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 31,5 МН. Прессовая установка и используемый в операции инструмент удовлетворяют условиям прочности.

Результатом выпускной квалификационной работы является полностью спроектированный технологический процесс изготовления титанового полособульба. Выполненные расчеты и моделирование обуславливают не только теоретическую возможность изготовления изделия, но и практическое бездефектное осуществление процесса в рамках предприятия ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 21937-76. Полособульб горячекатаный несимметричный для судостроения. М. : Издательство стандартов, 1976. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294831/4294831820.htm> (дата обращения 01.06.2024)
2. ТУ 1825-569-07510017-2005. Профили прессованные несимметричные полособульбовые из титанового сплава марки ПТ-3В. Верхняя Салда, ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».
3. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М. : Издательство стандартов, 1973. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294847/4294847701.htm> (дата обращения 01.06.2024)
4. ГОСТ 19807-91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. М. : Издательство стандартов, 1991. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294833/4294833611.htm> (дата обращения 01.06.2024)
5. Цвиккер У. Титан и его сплавы. Берлин – Нью-Йорк: Металлургия, 1974. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
6. ТИ-03-040-Т-2014. Производство тонкостенных профилей из титана и его сплавов на прессе усилием 3150 тс П667. Верхняя Салда, ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».
7. ТИ-СГТ-235-О-2014. Резка профилей из титановых сплавов на абразивно-отрезном станке модели 8252. Верхняя Салда, ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».
8. ТИ-03-030-Т-2007. Термическая обработка труб, прутков, штамповок и профилей из титановых сплавов в электропечи сопротивления с передвижной камерой. Верхняя Салда, ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».
9. ТИ-03-003-Т-2014. Правка и доводка профилей, труб и прутков. Верхняя Салда, ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

10. ТИ-НТЦ-014-Т-2004. Отжиг титановых труб, прутков и профилей. Верхняя Салда, ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».
11. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. Полуфабрикаты из титановых сплавов. М.: Металлургия, 1979. –512 с.
12. ТИ-03-005-Т-2014. Травление полуфабрикатов в ванне щелочного расплава.
13. Логинов Ю.Н. Прессование как метод интенсивной деформации металлов и сплавов: учеб. пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 156 с.
14. Лебедев В.А., Харитонин С.В. Оборудование кузнечно-штамповочных цехов. Часть 2. Гидравлические прессы. Учебное пособие. Екатеринбург, 2005. 81 с.
15. Банкетов А.Н. Кузнечно-штамповочное оборудование: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1982. 576 с.
16. Корнилов В.В. Гидропривод в кузнечно-штамповочном оборудовании. М.: Машиностроение, 2002. 224 с.
17. Михеев В.А. Гидравлические прессовые установки. Расчет, конструирование и эксплуатация. М.: МАШГИЗ, 1953. 375 с.
18. Логинов Ю.Н., Игнатович Ю. В. Инструмент для прессования металлов. Екатеринбург, 2014. 229 с.
19. Желобов В.В. Инструмент для горячего прессования металлов. М.-Л.: Машиностроение, 1965. 164 с.
20. Ерманюк М.З. Прессование панелей из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1974. 232 с.
21. Сталь марки 4X5МФС [Электронный ресурс]. – 2019 – URL: [http://metallischekiy-portal.ru/marki\\_metallov/sti/4X5MFS](http://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/sti/4X5MFS) (Дата обращения 05.06.2020).