

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

На правах рукописи

ГАМИН ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГОРЯЧЕЙ  
ПРОКАТКИ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК С ДНОМ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Специальность 05.02.09 – «Технологии и машины обработки давлением»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
проф., д.т.н.

Романцев Б.А.

Москва - 2017

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Литературный обзор.....	7
1.1 Способы получения полых заготовок малого диаметра .....	7
1.2 Подготовка исходной заготовки перед горячей винтовой прошивкой .....	11
1.3 Особенности нагревательного оборудования и процесса нагрева заготовок малого диаметра перед пластической деформацией .....	15
1.4 Анализ факторов, влияющих на точность размеров заготовок.....	18
Глава 2. Экспериментальные исследования.....	28
2.1 Методика исследований (характеристика оборудования и условия проведения эксперимента) .....	28
2.2 Анализ точности полых заготовок с дном.....	36
Глава 3. Расчет и проектирование оборудования АЛВП.....	41
3.1 Выбор технологической схемы.....	41
3.2 Расчеты .....	43
3.2.1 Расчет энергосиловых параметров процесса прошивки .....	43
3.2.2 Расчет напряжений и деформаций в рабочей клетки прошивного стана с применением МКЭ .....	47
3.2.3 Анализ устойчивости оправочного стержня .....	53
3.2.4 Виртуальное исследование деформаций оправки и стержня .....	55
3.2.5 Компьютерное моделирование процесса охлаждения заготовок малого диаметра.....	64
3.2.6 Определение влияния условий нагрева на точность полых гильз при прошивке .....	72
3.3 Техническая характеристика и состав оборудования АЛВП .....	75

3.4 Работа оборудования АЛВП .....	98
Глава 4. Опытнo-промышленное внедрение АЛВП.....	107
4.1 Экспериментальные исследования и освоение технологии горячей прокатки и калибрования полых заготовок.....	107
4.1.1 Методика исследований (характеристика оборудования и условия проведения эксперимента).....	108
4.1.2 Анализ процесса прошивки и точности полых заготовок с дном.....	115
4.2 Проектирование технологического процесса и инструмента.....	124
4.2.1 Методика определения исходной заготовки и полуфабрикатов .....	124
4.2.2 Проектирование технологического инструмента .....	135
Выводы .....	141
Список использованной литературы.....	143

## Введение

Широкое применение в машиностроительной и других отраслях промышленности находят полые заготовки малого диаметра различного назначения (полые оси, втулки, поршни, муфты и др.). На данный момент такие детали получают из сплошных заготовок путем многопереходной штамповки на прессовом оборудовании, либо полностью механической обработкой.

Технология холодной штамповки полых заготовок подразумевает под собой многопереходной процесс с промежуточными операциями термической обработки, что предопределяет низкую производительность, отсутствие автоматизации полного цикла производства и ограничивает марочный сортамент изделий. Кроме того, изготовление полых заготовок методамиковки и штамповки сопровождается повышенным радиальным биением, что приводит к увеличению припусков на механическую обработку.

Получение полых заготовок деталей машиностроения путем механической обработки также имеет ряд недостатков, главным из которых является низкий коэффициент использования материала (0,3...0,4). Вследствие этого весьма актуальной задачей является разработка эффективной технологии и комплекса оборудования для производства полых заготовок малого диаметра для деталей машиностроения.

Одним из методов пластической деформации, позволяющим снизить объем механической обработки является прошивка в станах винтовой прокатки, которая дает возможность приблизить форму заготовки к конфигурации готовой детали. Качество полых заготовок, полученных этим способом, в значительной мере определяется выбором технологических факторов и рядом особенностей, присущих данному процессу. Ранее преобладало мнение, что прокатку целесообразно применять только для получения прутков и труб постоянного круглого сечения. Фундаментальные исследования процесса прокатки в винтовых калибрах, выполненные во ВНИИМЕТМАШ, МИСиС и ряде других организаций [1–6], завершились успешным внедрением в промышленность новых



технологических процессов и оборудования для производства штучных профилированных заготовок различного назначения.

Данный способ получения полых заготовок с дном малого диаметра имеет ряд важных преимуществ по сравнению с применяемыми на данный момент технологиями:

- более высокая (в 2-3 раза) производительность;
- коэффициент использования металла повышается до 0,5...0,75 при производстве полых заготовок диаметром от 30 до 60 мм;
- автоматизация всего технологического процесса и снижение трудоемкости изготовления деталей.

При производстве коротких полых заготовок, имеющих габаритные размеры, соответствующие дефектным концам труб, процесс прокатки протекает в условиях неустановившихся режимов, что создает определенные трудности для формирования высокого качества продукции и стабильности результатов процесса. Кроме того, оборудование для реализации технологического процесса должно обладать высоким быстродействием и достаточной жесткостью для обеспечения заданной точности полых заготовок. Все это обуславливает проведение значительного объема теоретических и экспериментальных исследований по разработке эффективной технологии и комплекса оборудования для производства полых заготовок малого диаметра деталей машиностроительной отрасли.

В деталепрокатных технологиях целесообразно изготавливать изделия из штучных заготовок, однако при этом необходимо разработать специфические режимы их подготовки, нагрева, прошивки, калибрования и оборудование для реализации перечисленных операций.

Целью диссертационной работы является разработка технологии и оборудования для горячей прокатки полых заготовок с дном диаметром 30...60 мм.

Для достижения поставленной цели в работе определены следующие задачи:

- разработать схему технологического процесса производства полых заготовок малого диаметра и выбрать основное оборудование для ее реализации;
- провести анализ температурно-деформационных условий технологии с учетом вспомогательных операций;
- на основании компьютерного моделирования и экспериментальных исследований разработать технологические режимы процессов прошивки и калибрования;
- выполнить проектирование и расчеты специальной конструкции оборудования прошивного стана и калибровочного прессы;
- разработать методику определения размеров заготовки и полуфабрикатов полых заготовок и выполнить проектирование технологического инструмента.

На защиту выносятся следующие разработки, выполненные автором и отличающиеся научной и технической новизной:

- технология получения полых заготовок с дном диаметром 30...60 мм и конструкция оборудования автоматизированной линии винтовой прокатки для ее реализации (пат. № 2596519 РФ, МПК В21В19/06. Способ винтовой прокатки полых заготовок с дном; пат. № 2600594 РФ, МПК В21К21/06. Способ изготовления заготовок в форме стакана из прутка);
- технологические режимы процесса прошивки в трехвалковом стане винтовой прокатки и калибрования в механическом прессе полых заготовок с дном диаметром 30...60 мм, разработанные на основе МКЭ моделирования и экспериментальных исследований;
- методика проектирования технологической оснастки и инструмента для прошивки и калибрования полых заготовок с дном диаметром 30...60 мм;
- методика определения размеров заготовки и полуфабрикатов полых заготовок, позволяющая повысить коэффициент использования металла.

Работа выполнена на кафедре Обработки металлов давлением Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

## Глава 1. Литературный обзор

### 1.1 Способы получения полых заготовок малого диаметра

К наиболее распространенным изделиям машиностроения, для изготовления которых используют полые заготовки малого диаметра ( $D/S = 5 \dots 6$ ,  $d_{\text{нар}} = 20 \dots 60$  мм,  $d_{\text{вн}} = 16 \dots 35$  мм,  $L = 100 \dots 250$  мм), относятся муфты, втулки, полые оси, элементы гидравлических систем, производимые крупными и мелкими сериями.

Основным способом производства заготовок подобных деталей, но бóльших размеров (наружным диаметром 75...160 мм) раньше являлась горячая штамповка на горизонтальных и вертикальных прессах [7, 8]. Однако, существенным ограничением, не позволяющим производить на агрегатах подобного типа толстостенные полые заготовки малого диаметра, является низкая стойкость инструмента, находящегося под воздействием значительных термических и силовых нагрузок [9]. Кроме того, этими способами крайне затруднительно получать полые заготовки повышенной точности с разностенностью до 5 % [10–13] вследствие того, что пуансон в процессе прессования отклоняется от своей оси из-за значительной неравномерности температурного поля заготовки, анизотропии ее свойств и ряда других трудноуправляемых факторов. Существенной проблемой также является обеспечение соосности контейнера и пресс-штемпеля, для изготовления и сборки которых используется лазерная техника и другое дорогостоящее оборудование [14].

Холодная штамповка полых заготовок малого диаметра (рисунок 1) применяется в настоящее время при производстве деталей из сталей марок 08, 08кп, 09Ю, 10ЮА и др., которые обладают достаточной пластичностью. Технология подразумевает под собой многопереходной процесс (от 4 до 7 операций выдавливания) с промежуточными операциями термической обработки.



Рисунок 1.1 – Продольные темплеты заготовок, полученные технологией холодной многопереходной штамповки

Основным преимуществом данной технологии является высокий коэффициент использования металла, так как для некоторых поверхностей штампованной заготовки отсутствует необходимость в механической обточке заготовок после операции пластической деформации. В то же время существует ряд недостатков, которые делают описанный способ малоэффективным при современных требованиях отрасли – сравнительно низкая производительность, сложность автоматизации производства и высокие трудозатраты. Кроме того, в последнее время в качестве корпусов деталей машиностроения все чаще применяются высокоуглеродистые марки сталей, холодная штамповка которых не представляется возможной.

Другим способом получения полых заготовок малого диаметра в настоящее время является механическая обработка путем обточки и сверления внутренней полости. Этот способ реализуется на токарных полуавтоматических и автоматических металлорежущих станках. Исходной заготовкой является стальной пруток.

Операция сверления сопряжена со значительными техническими трудностями, обусловленными необходимостью удаления стружки и подачи смазочно-охлаждающих жидкостей в зону резания, а также низкой устойчивостью сверла, существенно снижающейся с увеличением глубины и уменьшением диаметра отверстия. Для обработки отверстий со сложной конфигурацией применяют сложное оборудование, снабженное циркуляционной системой смазки и охлаждения инструмента, специальной системой стружкоудаления, ряд узлов

этих систем являются прецизионными и, следовательно, дорогостоящими [15, 16]. Весьма серьезной проблемой является низкая стойкость инструмента, особенно при сверлении высокопрочных сталей [17-19]. К недостаткам способа механической обработки относят также низкий коэффициент использования металла (0,3...0,4 для деталей диаметром 30...60 мм), который снижается еще более по причине увода сверла с оси заготовки, и, как следствие, ведет к формированию разностенности и кривизны отверстия, что требует дополнительной механической обработки. Это влечет за собой увеличение времени цикла производства, повышение себестоимости продукции и трудоемкости.

Таким образом, вышеперечисленные способы получения полых заготовок малого диаметра не могут служить основой для создания современных высокопроизводительных малоотходных технологий получения полых заготовок малого диаметра.

Известен способ изготовления полых заготовок деталей диаметром 76...152 мм [20], разработанный в Московском институте стали и сплавов (рисунок 2), который включает в себя следующие основные операции: резку прутка пресс-ножницами на заготовки мерной длины; нагрев заготовок в индукционном нагревателе; калибрование и зацентровку нагретой заготовки в трехвалковом стане винтовой прокатки; прошивку ее в стане винтовой прокатки; калибрование донной части гильзы-стакана на прессе; продольную профильную прокатку-протяжку стакана на длинной профильной оправке через блок клеток с неприводными рабочими валками, профилированными соответственно профилю стакана перед обжимом; охлаждение и промежуточный контроль; подогрев головной части стакана в индукторе; валковый обжим на оправке в стане винтовой прокатки; охлаждение и контроль; чистовую механическую обработку.

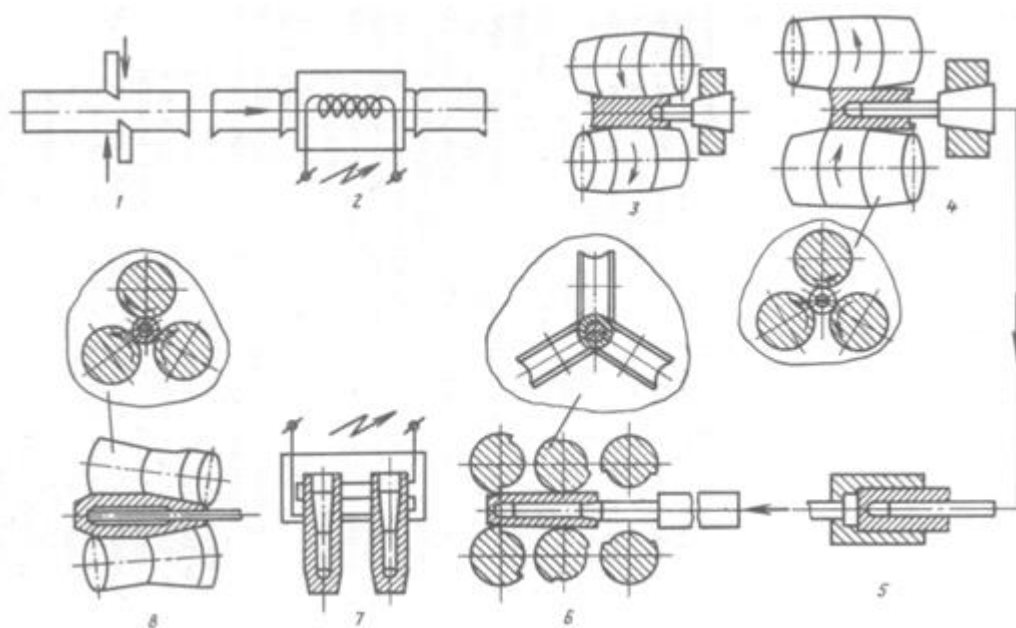


Рисунок 1.2 – Технологическая схема изготовления полых заготовок диаметром 76...152 мм: 1 – резка прутка на заготовки; 2 – нагрев; 3 – зацентровка заготовки; 4 – винтовая прошивка; 5 – калибровка донной части стакана; 6 – профильная протяжка; 7 – подогрев головной части стакана; 8 – валковый обжим

В схеме использованы достижения прокатного производства, которые позволяют получать заготовки с минимальным припуском на механическую обработку. Кроме того, прокатка благодаря непрерывности процесса является наиболее производительным методом обработки металлов давлением.

Особенностями описанной схемы технологического процесса являются прошивка способом винтовой прокатки штучной заготовки в гильзу с дном, профильная протяжка стакана на оправке через неприводные клетки, обжим оживальной части профилированного стакана без черновой механической обработки в трехвалковом стане винтовой прокатки.

Описанная выше деталепрокатная технология реализована на автоматизированной линии винтовой и продольной прокатки АЛВПП, которая представляет собой автоматизированный машинный комплекс для осуществления методами горячей прокатки законченного технологического процесса изготовления полых профилированных изделий из сплошной круглой заготовки. По сравнению с прессовыми установками линия обладает более высокой

производительностью (в 2-3 раза) и отличается высоким уровнем автоматизации производства.

Таким образом, сравнительный анализ указывает на существенные преимущества технологии получения полых заготовок на основе горячей винтовой прошивки по сравнению с методами штамповки или механической обработки. Однако, малые размеры деталей и требования по точности их изготовления говорят о необходимости проведения исследований и разработки режимов технологического процесса.

## 1.2 Подготовка исходной заготовки перед горячей винтовой прошивкой

К заготовкам для деталей прокатных процессов предъявляют повышенные требования по правильности формы, точности по длине и диаметру, соответствию объема (массы) заготовки объему (массе) прокатанной заготовки детали [20].

Резка исходной заготовки на мерные длины является ответственной операцией, определяющей расход металла, трудоемкость процесса резки и качество торца заготовки. К основным характеристикам, определяющим качество торца мерной заготовки, относят: а) овальность; б) неперпендикулярность оси заготовки; в) шероховатость поверхности; г) отсутствие заусенца.

Известно, что резка может производиться в холодном, теплом и горячем состоянии. Наиболее распространенными способами разделения являются резка сдвигом, ломка, газопламенная и плазменная резка, резка на механических пилах, резка абразивными кругами и анодно-механическая резка [21].

В трубном производстве чаще других используется резка сдвигом в холодном, теплом или горячем состоянии, ломка в холодном состоянии, резка пилами в холодном и горячем состоянии, а также резка ацетиленовой и плазменной горелкой [21].

Резку прутка сдвигом производят обычно на кривошипных пресс-ножницах. При этом неизбежно происходит смятие торца и, как следствие, образуется его неперпендикулярность. Резка прутка в штампах по неполнотью

закрытой и закрытой схемам позволяет улучшить качество торца, однако связана с эксплуатацией штампов весьма сложной конструкции [20, 21].

При резке заготовок высокого качества для каждого типоразмера прутка используют свой комплект ножей, по форме и размерам рабочего калибра максимально приближенных к профилю разрезаемого проката. При использовании ножей одного размера для разрезки штанг разных сечений качество концевых участков отрезанных заготовок ухудшается [21].

Холодная ломка является безотходным способом деления проката на заготовки путем его разрушения по предварительно нанесенным концентраторам напряжений (надрезам) при поперечном нагружении. Используется в основном для деления проката из металла высокой твердости (сталей марок 45, 40Х, ШХ15 и др.).

Преимущества холодной ломки заключаются в малой энергоемкости, простоте и долговечности инструмента, возможности использования универсального оборудования, возможности контроля качества металла по виду излома.

К недостаткам процесса относятся невозможность его применения для деления заготовок из пластичных металлов, необходимость предварительного нанесения концентраторов, невысокое качество торцевой поверхности, нестабильность размеров и объема получаемых заготовок, возможное образование торцевых трещин при ломке проката из высоколегированных сталей некоторых видов, а также повышенные требования по технике безопасности из-за возможности поражения отлетающими с высокой скоростью кусками металла и сильного звукового эффекта при мгновенном уменьшении усилия в момент отделения заготовки.

Резка дисковыми пилами применяется для деления заготовок в холодном и горячем состояниях. В качестве инструмента используются пилы с цельными, вставленными зубьями и сменными сегментами. Диаметр пил – от 300 до 2000 мм, толщина 2...15 мм. Обеспечивается хорошее качество поверхности реза, возможность отрезки очень коротких заготовок, отсутствие зоны термического



влияния, универсальность (возможность резки различных полуфабрикатов). К недостаткам резки относятся наличие отходов, высокая стоимость инструмента, потребность в заточных станках, загрязненность рабочего места стружкой, сложность отрезки заготовок из высокопрочных материалов, сильный шум при работе инструмента [21].

Резка на ленточных пилах характеризуется меньшим расходом металла в стружку по сравнению с дисковыми пилами, так как рабочее полотно имеет меньшую толщину (до 5 мм). При этом обеспечивается высокая перпендикулярность торца заготовки и отсутствие заусенцев. Производительность данного способа может быть повышена при применении пакетной резки, однако ограничивается конструкцией применяемых пил.

Газопламенная, плазменная резка и анодно-механическая резка для деталей прокатных технологий практически неприменима, так как не обеспечивает требуемого качества поверхности реза.

Таким образом, анализ способов резки исходной заготовки на мерные длины показал, что с точки зрения качества торцевых поверхностей, наиболее предпочтительным является раскрой на ленточных или дисковых пилах. При этом выбирать следует исходя из требований к заготовке, возможности экономии, требуемой производительности и технических возможностей оборудования.

Известно [21, 22], что нанесение зацентровочного углубления на передний торец исходной заготовки (зацентровка) обеспечивает улучшение условий захвата, а также снижает разностенность переднего конца гильзы - полой заготовки в результате точной установки прошивной оправки в момент встречи с прокатываемой заготовкой. Большинство исследователей [20, 22-24] сходятся во мнении, что высокая разностенность передних концов гильз (до 25...30 %) – результат неудовлетворительной подготовки концов заготовок, в частности, отсутствия или низкой точностью нанесения центрирующего углубления, образования овальности и неперпендикулярности торца при резке прутков. Качественная зацентровка снижает уровень поперечной разностенности передних концов гильз и труб.

Основными параметрами качества зацентровки являются разностенность, форма и глубина зацентровочного углубления. Форма торца исходной заготовки, его овальность, перпендикулярность оказывают существенное влияние на параметры качества зацентровки.

Зацентровка может производиться в холодном состоянии засверливанием или выжиганием ацетиленовым пламенем, либо в горячем состоянии выдавливанием отверстия бойком [21].

Зацентровка в пневматических устройствах осуществляется многократным либо однократным ударным воздействием на торец заготовки бойка, размещенного на штоке пневматического цилиндра. Недостатком такого способа является невозможность точного центрирования заготовки относительно бойка, что приводит к высокой разностенности зацентровочного углубления.

Известно устройство (рисунок 3) для калибровки и зацентровки коротких заготовок диаметром от 75 до 160 мм на базе трехвалкового стана, которое разработано в Московском институте стали и сплавов [20].

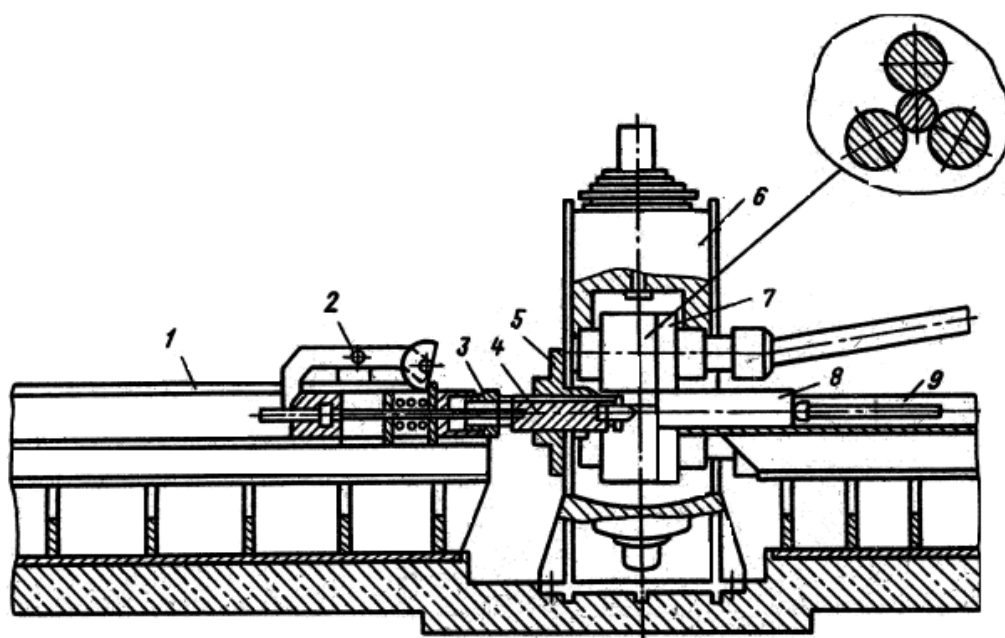


Рисунок 1.3 – Устройство для зацентровки заготовки на базе опытно-промышленного стана

МИСиС-100: 1 – выходная сторона; 2 – замковое устройство; 3 – регулятор глубины зацентровки; 4 – центрирующее устройство; 5 – боек; 6 – рабочая клеть; 7 – рабочий валок; 8 – заготовка; 9 – входная сторона

Этот способ обеспечивает достаточную точность нанесения зацентровочного углубления (эксцентриситет до 0,5 мм), однако требует установки дополнительного оборудования и изготовления высокоточного технологического инструмента. Кроме того, заготовки малого диаметра и длины будут значительно остывать за время выполнения операции зацентровки, поэтому в данном случае зацентровка в стане-зацентровщике в горячем состоянии является малоэффективной.

Для точной зацентровки рациональнее засверливание исходных заготовок в холодном состоянии, при котором достигается разностенность зацентровочного углубления до 0,2 мм. Диаметр зацентровочного углубления должен подбираться с учетом радиуса носика прошивной оправки, а глубина – 0,6...0,8 от диаметра зацентровки.

### 1.3 Особенности нагревательного оборудования и процесса нагрева заготовок малого диаметра перед пластической деформацией

Нагрев заготовок перед обработкой давлением осуществляют для повышения пластичности металла и уменьшения его сопротивления деформации. С повышением температуры нагрева более  $1/3$  абсолютной температуры плавления в металле начинают протекать процессы возврата и рекристаллизации, которые ведут к разупрочнению материала и снятию остаточных напряжений от предыдущей обработки. Деформирование заготовок желательно осуществлять при высоких температурах, так как металл в этом интервале обладает большой пластичностью, малым сопротивлением деформации и на его формоизменение затрачивается меньше энергии [20].

К способам нагрева заготовок предъявляют следующие требования: достаточная точность и равномерность распределения температуры по сечению и длине заготовки; заданная производительность; минимальное окисление и обезуглероживание поверхности заготовки и др. Наиболее жесткие требования к

нагреву предъявляются при точных способах формоизменения, например в деталях прокатных технологиях.

Широкое распространение на машиностроительных предприятиях получили способы нагрева металла под пластическую деформацию в печах сопротивления и индукционных установках.

Нагрев в электрических печах сопротивления обеспечивает равномерное распределение температуры в заготовке и позволяет снизить угар металла по сравнению с печами газопламенного нагрева [25]. Однако он обладает низкими производительностью и экономичностью. Кроме того, до настоящего времени не разработаны надежные конструкции электрических печей проходного типа, что затрудняет автоматизацию процесса нагрева.

Использование печей индукционного типа позволяет еще более снизить потери на окалину и уменьшить глубину обезуглероженного слоя [26-28]. Индукционные установки, работающие при высоких частотах тока  $f \geq 1000$  Гц, используют в основном для скоростного нагрева [29], промышленная же частота  $f = 50$  Гц применяется главным образом в печах для термообработки [30], однако выбор частоты производится исходя из размеров заготовок и требуемой производительности. Нагрев в индукционных установках сопровождается значительной неравномерностью распределения температуры по поперечному сечению. Это объясняется тем, что вихревые токи, под действием которых нагревается металл, индуцируются в поверхностных слоях, что приводит к интенсивному нагреву последних. Нагрев центральных слоев заготовки происходит теплопроводностью от наружных. Температурный перепад между центром заготовки и ее периферией неблагоприятно сказывается на точности гильз, тогда как наличие в заготовке равномерного температурного поля улучшает показания разностенности [31, 32]. В работе [33] приводятся данные о том, что создание «обратного» перепада температур, когда температура центральных слоев выше температуры периферийных, позволяет уменьшить разностенность гильз за счет центрирующего эффекта, действующего на оправочный стержень и возникающего в связи с подстуживанием наружных слоев

заготовки, обладающих большим в сравнении с серединой заготовки сопротивлением деформации.

Авторами [20] описаны разработки нескольких типов нагревателей, различающихся по схеме индукционного нагрева и по схеме продвижения заготовок через индуктор.

Предпочтение отдано двухчастотному нагреву, который предусматривает нагрев заготовок токами двух частот: промышленной  $f = 50$  Гц до  $700 \dots 750$  °С; повышенной 1000 Гц до 1200 °С, что обеспечивает максимальный КПД процесса. Повышение КПД позволило уменьшить расход электроэнергии на 1 т нагреваемого металла. Кроме того, двухчастотный нагрев позволяет почти вдвое сократить капитальные затраты по сравнению с одночастотным нагревом благодаря уменьшению числа преобразователей частоты.

Двухчастотный нагрев предпочтителен и в целях равномерности нагрева по сечению, что является важнейшим фактором, влияющим на точность прокатываемых заготовок. Для одночастотного нагрева характерен резкий перепад температур между поверхностью и центром заготовки, который в области температур фазовых превращений  $700 \dots 800$  °С составляет  $400 \dots 600$  °С. При дальнейшем нагреве перепад сокращается до  $100 \dots 150$  °С и к моменту выгрузки заготовки составляет не менее 50 °С.

При двухчастотном нагреве максимальный перепад температур в начале процесса составляет  $100 \dots 150$  °С. Затем температура заготовки выравнивается по всему объему и выдерживается в пределах  $1/4$  общего времени нагрева без изменений, что необходимо для термостатирования заготовок и стабилизирует температурные перепады между сердцевиной и периферийными участками.

По схеме перемещения заготовок через индуктор для нагревателей толкательного типа характерно разрушение индукторов из-за застревания проталкиваемых заготовок, быстрый износ направляющих.

Применение в нагревателях принципа шагового перемещения заготовок исключает недостатки, присущие нагревателям толкательного типа, повышает надежность работы и качество нагрева заготовок. Однако для обеих схем

перемещения имеет место снижение температуры заготовки в нижней части на  $40...60^{\circ}\text{C}$ . Это приводит к смещению оправки во время прошивки заготовки в сторону более нагретой части и, следовательно, к повышенной разностенности прошитых заготовок и их искривлению.

Достичь равномерного нагрева заготовок удалось за счет создания индукционного нагревателя с вращением заготовок в процессе нагрева. При такой конструкции все точки поверхности заготовки, расположенные по окружности, находятся в одинаковых условиях и прогреваются до одинаковой температуры. Однако данная конструкция имеет сложное конструктивное исполнение и может приводить к частому выходу из строя движущихся частей механизма перемещения заготовок.

Таким образом, анализ различных методов нагрева штучных заготовок малого диаметра перед операциями обработки давлением показывает, что рациональным способом является нагрев заготовок в индукционной установке. Однако, для получения точных гильз с минимальным значением разностенности после прошивки, к нагреву заготовок должны быть предъявлены жесткие требования, в частности, к неравномерности распределения температуры по поперечному сечению и длине. Осуществление данных требований возможно, например, за счет применения вращающихся направляющих в индукторе или введению дополнительного устройства для термостатирования заготовок после индукционного нагрева.

#### 1.4 Анализ факторов, влияющих на точность размеров заготовок

В предложенной деталепрокатной технологии основной операцией формоизменения является прошивка заготовки в трехвалковом стане винтовой прокатки на оправке, выводимой из очага деформации непосредственно в процессе прокатки для получения дна заданной толщины. Контролируемыми размерами полых заготовок с дном являются: диаметр гильзы и толщина ее стенки, диаметр донной части и толщина дна, общая длина полый заготовки.

Допускаемые отклонения этих размеров значительно меньше, чем отклонения по ГОСТ 8732-78 для горячекатаных труб.

Точность получаемых заготовок определяется способом производства, конструкцией оборудования и уровнем технологии, которые в свою очередь зависят от целого ряда различных факторов. Весь комплекс оборудования можно рассматривать как технологическую цепь, состоящую из ряда звеньев. В каждом звене этой цепи происходит как исправление погрешностей, возникших на предыдущих операциях, так и образование новых погрешностей, обусловленных конструкцией оборудования и режимом деформации. Таким образом, точность готовых деталей в общем случае является результатом формоизменения заготовки на всех этапах технологического процесса [34, 35].

Значительные трудности представляет определение влияния различных факторов на точность толщины стенки готовой полой заготовки. Для этого необходимо подробнее рассмотреть основные операции технологического процесса.

*Подготовка исходной заготовки.* Качество заготовки, определяющее перпендикулярность ее торца оси заготовки, овальность, неравномерность и неоднородность рельефа ее поверхности существенно влияют на условия захвата заготовки валками прошивного стана и, особенно на образование при этом концевой разностенности, которую никаким способом зацентровки заготовки устранить нельзя [35]. Для уменьшения разностенности переднего конца полой гильзы и улучшения захвата заготовки валками прошивного стана ее зацентрируют. Особенно необходима зацентровка при прошивке толстостенных гильз. Резка исходных заготовок производится различными способами: в холодном и горячем состоянии на прессах, ножницах или пилах [21]. При раскросе прутка на исходные заготовки безотходным способом (на прессах или ножницах) косина торца значительно больше, чем при раскросе на пилах, что также вызывает образование разностенности на гильзах из-за отклонения носика оправки от оси при вторичном захвате.

*Нагрев заготовки.* Режим нагрева заготовки в значительной мере определяет качество получаемых деталей, производительность установки и энергосиловые параметры процесса прокатки. Процесс нагрева представляет собой важную технологическую операцию и при рассмотрении вопросов, связанных с оценкой фактической точности геометрических размеров полых заготовок, особенно по толщине стенки, следует всегда учитывать возможное влияние на них некачественного нагрева исходной заготовки.

Для обеспечения точности гильз и труб необходимо, чтобы нагрев заготовки происходил равномерно по сечению и длине [20, 31, 34]. Большинство исследователей единодушны в оценке влияния неравномерного нагрева на колебания размеров гильз, однако количественные оценки этой зависимости не приводятся, что, по-видимому, объясняется трудностью анализа одновременно действующих факторов нагрева и прошивки.

Большая разница в температурах нагрева отдельных заготовок или по длине одной заготовки приводит при последующей прошивке к большому разбросу размеров гильз. При деформации менее прогретой части заготовки возрастает сопротивление деформации, растут упругие деформации механизмов прошивного стана и, как следствие, возрастают толщина стенки или диаметр гильзы в данном месте. Неравномерность температуры по сечению заготовки вызывает неравномерность сопротивления деформации металла, возникновение смещающей силы, и оправка при прошивке отклоняется от оси прошивки, вследствие чего создается неравномерность толщины стенки в поперечном сечении гильзы. Исправить такие дефекты нагрева никакими перестройками стана невозможно, поэтому единственным средством избежать их является улучшение качества самого нагрева [34].

Так, по опытным данным МИСиС, разностенность гильз при прошивке в трехвалковом стане заготовок, нагретых до равномерной температуры по сечению, составила 10...12 %, а заготовок, перепад температуры у которых по периметру был равен всего 30...35 °С, разностенность достигала 15...20 % [36].



*Прошивка.* Особенности процесса прошивки в станах винтовой прокатки приводят к образованию разностенности гильз, которая, уменьшаясь по абсолютной величине с ростом деформации, не устраняется полностью на последующих технологических переделах.

Все факторы, влияющие на отклонения толщины стенки гильзы, можно разделить на три группы: 1) факторы, связанные с самой природой прошивки в стане винтовой прокатки; 2) технологические факторы и 3) факторы, связанные с конструкцией прошивного стана.

Появление разностенности при прошивке гильз объясняют сложным движением оправки в очаге деформации под действием на нее возмущений со стороны деформируемого металла и стержня. Отклонение носка оправки относительно оси заготовки в момент соприкосновения с ней и определяет в итоге толщину стенки гильзы в данном сечении [37-40].

К технологическим факторам, влияющим на положение оправки в очаге деформации, а, следовательно, и на разностенность гильз, нужно отнести качество торцов заготовки и величину ее овальности, неравномерность нагрева, точность зацентровки переднего торца, частоту вращения валков, соответствие калибровки инструмента установленным углам подачи, величину обжатия, износ рабочего инструмента.

Недостаточная жесткость стержня может быть одной из главных причин повышенной разностенности гильз: по расчетам авторов [35], разностенность гильз только по этой причине может достигать 5...10 %. Так как при увеличении жесткости системы оправка - оправочный стержень - центrovатели разностенность гильз резко снижается, при этом необходимо создать условия для уменьшения вибраций системы во время прошивки, обеспечив стабилизацию положения стержня с оправкой на оси прошивки.

Таким образом, принимая во внимание факторы, влияющие на точность полых гильз при прошивке, можно представить точность  $T$  в виде функции:

$$T = f(C_p, C_o, \Delta T, \Delta X, \dots), \quad (1)$$

где  $C_p$  – жесткость станины клетки прошивного стана;

$C_o$  – жесткость оправочного стержня;

$\Delta T$  – качество нагрева заготовок перед прошивкой;

$\Delta X$  – точность настройки прошивного стана.

*Износостойкость инструмента стана винтовой прокатки и пресса.* Износ технологического инструмента влияет на качество продукции, в том числе определяет допуски на механическую обработку, поэтому вопрос стойкости инструмента является актуальным и постоянно находится в поле зрения исследователей.

В общем случае, износ инструмента при горячей обработке металлов давлением зависит от следующих факторов:

- времени контакта инструмента с горячим металлом в процессе обработки;
- химического состава и физико-механических свойств инструмента и обрабатываемого материала;
- характера контактного трения на поверхности инструмента и заготовки;
- температуры и качества нагрева заготовок;
- размеров обрабатываемых заготовок;
- калибровки инструмента;
- силовых условий процесса;
- условий охлаждения и смазки инструмента и др.

Кроме того, каждый вид рабочего инструмента имеет различную износостойкость, так как работает в различных силовых и термических условиях [40].

При изготовлении заготовок малого диаметра и длины все перечисленные выше факторы являются критичными. Поэтому требования к материалу, из которого изготавливается инструмент, чрезвычайно высоки и разнообразны.

Вместе с тем, не менее важным вопросом является нанесение технологической смазки и охлаждения рабочего инструмента в паузах между операциями рабочего цикла и во время прокатки.

При выборе смазки руководствуются, прежде всего, удовлетворением основных функциональных требований: снижение контактных напряжений и уменьшение энергозатрат, связанных с преодолением трения; повышение износостойкости инструмента и повышение чистоты поверхности изделий; предотвращение схватывания и налипания металла на инструмент; охлаждение инструмента. Кроме того, смазка должна удовлетворять требованиям технического, экономического и санитарно-гигиенического характера; стабильность ее состава и физико-химических свойств при эксплуатации; удобство подачи ее на инструмент и заготовку; простота изготовления смазки; ее очистка и регенерация в процессе эксплуатации; легкость удаления смазки с поверхности изделий; отсутствие вредного воздействия на металл и оборудование; нетоксичность и отсутствие неприятного запаха; минимальное загрязнение рабочего места и окружающей среды; экономическая целесообразность применения и недефицитность [41, 46].

Смазки и смазочные композиции для конкретных процессов обработки металлов давлением выбираются эвристически с использованием сведений об аналогах [42].

В процессе прокатки рабочие валки прошивного стана взаимодействуют с горячим металлом до 1200 °С в течении 2...8 с. Во время прокатки и в паузах рабочая поверхность валков обильно охлаждается водой.

Основной причиной выхода валков из строя является интенсивный износ рабочей поверхности в конусе прошивки [20, 43]. Конус раскатки в процессе работы практически не меняет своей формы.

Авторами [20] был проведен обширный анализ условий работы валков прошивного стана винтовой прокатки и закономерностей их износа. Полученные данные показывают:

- материалостойкость валков практически не зависит от их калибровки и настройки прошивного стана;
- износ происходит в основном в результате «высверливания» валка острыми кромками торца невращающейся в момент подачи в стан заготовки;

– особенно интенсивно валки изнашиваются в начальный период работы. Постепенно интенсивность роста глубины максимального износа уменьшается.

Для повышения тянущих сил при первичном и вторичном захвате в прокатном производстве применяют электроискровое легирование, процесс которого заключается в обработке упрочняемой поверхности валков с помощью вибрирующего электрода – анода (валок является катодом), в результате которой между поверхностью валка и электродом периодически возникают искровые разряды регулируемой мощности. Кроме того, авторами [20] отмечено, что при прошивке заготовок на валках, обработанных ЭИЛ, наружные дефекты исходных заготовок в процессе прошивки развития не получают, а износ рабочей поверхности валков уменьшается в 2-3 раза.

Во время работы оправка прошивного стана подвергается достаточно длительному циклическому воздействию высоких температур и больших давлений, поэтому материал оправок должен обладать высокой прочностью, термостойкостью и повышенной теплопроводностью. Даже при высокой прочности материала, но при недостаточной его термостойкости и теплопроводности носок оправки разогревается, теряет форму, и оправка выходит из строя. Кроме того, поверхность оправки не должна свариваться с прокатываемым металлом. Это достигается образованием окисной пленки на поверхности оправки при термообработке и при контакте ее во время работы с прокатываемым металлом [20, 47].

На износостойкость оправок существенно влияет большое количество факторов: химический состав материала и режим термообработки оправок, их калибровка, марка прокатываемой стали, качество нагрева заготовок, режим прокатки, условия охлаждения оправок.

Стойкость оправок повышается, если во время прошивки их охлаждают изнутри и снаружи. Однако, оправки, используемые в разрабатываемой технологии весьма проблематично изготавливать с внутренней полостью для

охлаждения ввиду их малых размеров. Поэтому, в данном случае с особой важностью необходимо подходить к вопросу выбора материала оправок.

Как показывает опыт, достаточно высокими показателями износостойкости обладает сталь марки 4X5МФС.

Эффективным способом повышения износостойкости оправок является наплавка на ее рабочую поверхность жаропрочных материалов.

Сущность процесса наплавки состоит в расплавлении присадочного металла с высокими эксплуатационными свойствами теплом газового пламени, электрической дуги или других источников тепла и соединении его с основным металлом детали. При этом способе можно сравнительно быстро получить слой наплавленного металла значительной толщины. Операции наплавления в этих случаях можно проводить многократно, что уменьшает расход запасных частей [44].

Наплавку металлов с необходимыми свойствами применяют также для повышения твердости и износостойкости рабочих поверхностей деталей, изготовленных из обычных конструкционных сталей.

Методом наплавки можно создавать биметаллические изделия, у которых высокие показатели поверхности сочетаются с удовлетворительной вязкостью сердцевины, изготовленной из дешевой углеродистой стали. Это позволяет получить большую экономию дорогих легированных сталей.

Широкое применение наплавка получила в связи с гибкостью, простотой и экономичностью этого способа, возможностью наносить на поверхность детали материала любого химического состава и физико-механических свойств. Это позволяет создавать на поверхности деталей слой материала, обладающий различными свойствами: хорошей сопротивляемостью износу при комнатных и повышенной температурах, высокой твердостью и жаростойкостью, способностью сопротивляться термической усталости, сохранять длительную стойкость в агрессивных средах, иметь высокую стойкость против абразивного износа.

Существует опыт использования в виде наплавочного материала высоколегированных сплавов ВЖ-98, ЭП-567, ЭИ-131, ЭК-31, обладающих высокой термостойкостью. Применение данных сплавов в качестве материала оправок для прошивки заготовок малого диаметра может быть наиболее рациональным ввиду невозможности осуществления охлаждения оправки изнутри.

Таким образом, высокая износостойкость оправки достигается путем рационального выбора материала и наплавки рабочей поверхности жаропрочным сплавом (в случае малых размеров – изготовление всего тела оправки), выбором режимов, обеспечивающих минимальное время прошивки, организацией охлаждения оправки.

Стоит отметить, что высокая износостойкость оправок способствует снижению разностенности благодаря более симметричному распределению нагрузки на инструмент в процессе деформации и обеспечивает стабильное состояние размеров камеры полый гильзы.

Окончательные размеры полый заготовки и качество поверхности сообщаются на операциях подпрессовки и протяжки. Поэтому инструмент на прессе необходимо тщательно контролировать и заменять принудительно в случае обнаружения на заготовках дефектов, выходящих за пределы допусков.

Быстроизнашивающимся инструментом в прессовом оборудовании являются пуансон и матрица, а также протяжные кольца при протяжке [20, 45, 46]. Они плотно контактируют с горячим металлом при температуре 1000...1100 °С в течении 3...4 с, при этом в процессе калибрования донной части возникают достаточно большие усилия. Поэтому в паузах между операциями прессования рабочий инструмент необходимо охлаждать водой, а в целях снижения усилия подпрессовки и повышения износостойкости на рабочую поверхность наносить технологическую смазку.

В качестве охлаждающей жидкости используется вода. Перед подачей полый гильзы в приемный лоток прессы в ее внутреннюю полость подается порция сухой технологической смазки. В качестве данной смазки возможно использовать

мелкодисперсный порошок триполифосфата натрия [47, 48]. Он хорошо изолирует деформируемый металл от пуансона, что способствует снижению коэффициента трения и обеспечивает легкий съём заготовки с пуансона после протяжки. Кроме того, в контейнере, предназначенном для установки в него протяжных колец, предусмотрена кольцевая полость, куда перед операцией протяжки закладывается густая смазка, которая также позволяет снизить коэффициент трения между поверхностью заготовки и инструментом.

На основании проведенного анализа, можно сказать, что увеличение срока службы прессового инструмента должно идти по следующим трем направлениям:

- изыскание новых более стойких марок сталей и сплавов;
- применение двухслойного инструмента с жаропрочной контактной поверхностью;
- рациональный выбор технологической смазки и обеспечение охлаждения инструмента.

Кроме того, необходимо добиваться повышения износостойкости инструмента за счет рационального нагрева заготовок перед операциями обработки давлением [49].

Таким образом, проведен анализ основных факторов, определяющих точность размеров коротких полых заготовок малого диаметра. Достижение заданной точности полых заготовок обеспечивается: подготовкой исходной штучной заготовки, равномерным нагревом заготовки по поперечному сечению и длине, прошивкой в трехвалковом стане на оправке с коротким оправочным стержнем и быстродействующим механизмом ее вывода из очага деформации.

Анализ технической литературы и опытных данных показал, что для получения полых заготовок малого диаметра наиболее рациональным является выбор технологической схемы на основе горячей винтовой прошивки с последующим калиброванием на прессе. При этом наибольшее внимание при проведении исследований следует уделить температурным условиям процесса и созданию конструкции быстродействующего оборудования, обладающего высокой жесткостью.

## Глава 2. Экспериментальные исследования

### 2.1 Методика исследований (характеристика оборудования и условия проведения эксперимента)

*Прошивка заготовок диаметром 30 мм.* Экспериментальные исследования процесса прошивки полых заготовок с дном выполнены на опытно-промышленном стане МИСиС-130Д, общий вид рабочей клетки которой представлен на рисунке 2.1. Техническая характеристика стана приведена в таблице 2.1.



Рисунок 2.1 – Рабочая клеть прошивного стана винтовой прокатки МИСиС-130Д

Таблица 2.1 – Техническая характеристика прошивного стана винтовой прокатки МИСиС-130Д

Наименование параметра	Значение
Рабочие валки:	
диаметр в пережиме, мм	430
длина бочки, мм	320
частота вращения, мин <sup>-1</sup>	57/114
угол раскатки, град	0
угол подачи, град	9...24
Направляющий инструмент	линейки
Главный привод:	
тип	Индивидуальный
мощность электродвигателя, кВт	2x200
крутящий момент на одном валке, кН·м	25
Тип выходной стороны	С боковой выдачей гильз
Осевое усилие на оправку, кН	до 300
Заготовка:	
диаметр, мм	30...120
длина, мм	80...800



В качестве исходного материала использовался калиброванный горячекатаный прутки из стали 50 диаметром 31 мм, который разрезался на штучные заготовки длиной 85 мм на ленточной пиле. Для улучшения условий вторичного захвата и уменьшения разностенности с одного торца заготовки путем сверления в холодном состоянии наносилось зацентровочное углубление диаметром 12 мм и глубиной 7...8 мм. Несоосность заготовки и зацентровочного углубления не превышала 0,15 мм.

Перед прошивкой заготовки в вертикальном положении нагревали в камерной электрической печи сопротивления до температуры  $1150^{\circ}\text{C}$  в течении 15...20 минут. Время транспортировки нагретых заготовок от печи до входной стороны прошивного стана составляло 2...4 с.

Рабочие валки стана имели калибровку с углами конусности  $\phi_1 = 2^{\circ}30'$  и  $\phi_2 = 3^{\circ}$  (рисунок 2.2). Материал валков – сталь 45 с твердостью рабочей поверхности около HB 190...200.

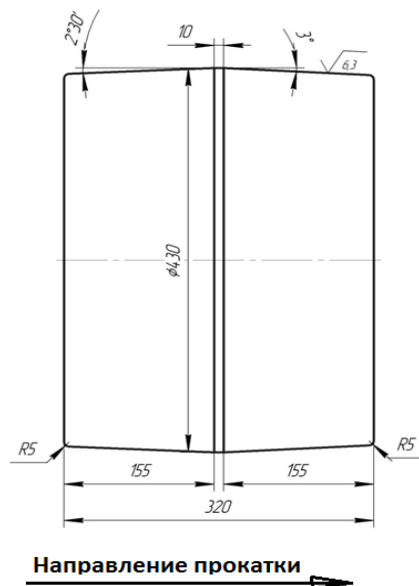


Рисунок 2.2 – Бочка валка прошивного стана МИСиС-130Д

В качестве направляющего инструмента при прошивке на двухвалковом стане использовали линейки из высоколегированного сплава (бидулоидный чугун) с твердостью HRC 60...62 (рисунок 2.3).

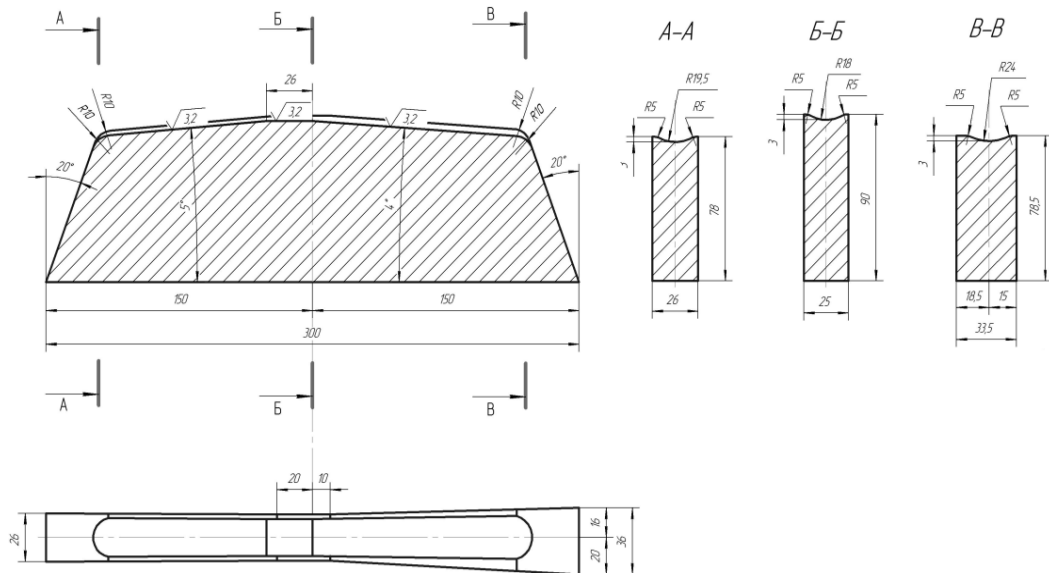
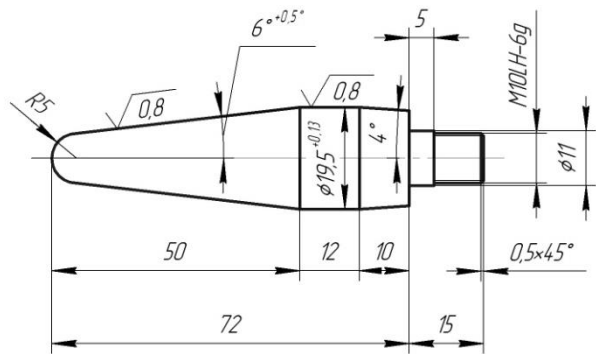


Рисунок 2.3 – Направляющая линейка прошивного стана

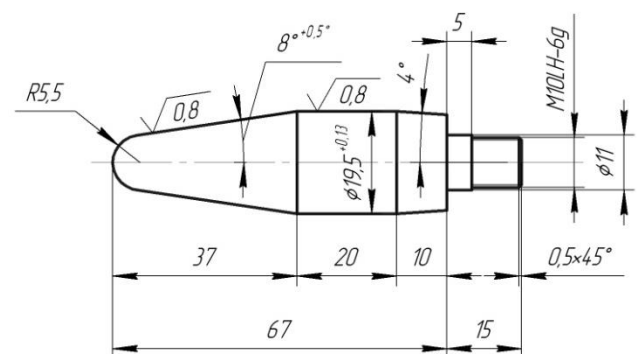
Для прошивки заготовок были выбраны 2 типа оправок диаметром 19,5 мм с углом конусности рабочей поверхности  $6^\circ$  длиной 72 мм (рисунок 2.4, а) и  $8^\circ$  длиной 67 мм (рисунок 2.4, б). Для схода гильзы с оправки после цилиндрического пояска выполнен обратный конус длиной 10 мм с углом наклона  $4^\circ$ . Оправки изготовлены из стали 4X5МФС с левой резьбой хвостовика для предотвращения раскручивания в процессе прокатки.

Перед работой оправки проходили термообработку в камерной электрической печи в течение 30...35 минут при температуре  $930^\circ\text{C}$  для образования слоя окалины на рабочей поверхности, которая служит своеобразной смазкой и предотвращает налипание деформируемого металла на инструмент.

Во время проведения экспериментов фиксировались геометрические параметры получаемых полых гильз, а также температура нагрева перед прошивкой и температура окончания процесса.



а)



б)

Рисунок 2.4 – Оправки прошивного стана для прошивки заготовки диаметром 31 мм

Выходная сторона стана была оснащена специальным быстродействующим рычажным устройством, которое позволяет получать гильзы с дном (рисунок 2.5). Работа стана осуществлялась следующим образом. Заготовка захватывается валками, и металл, перемещаясь по винтовой траектории, встречается с неподвижной в осевом направлении оправкой, раскатывается на ней и прошивается на заданную глубину. Затем передний торец гильзы встречается с втулкой, которая перемещает плиту с зацепами. При этом зацепы поворачивают опорные полудиски и осевое усилие передается на упорную головку, которая поднимает рычаги. Благодаря этому оправка со стержнем убирается из очага деформации и вместе с упорной головкой перемещается в крайнее заднее положение. Прошитая заготовка подвергается дальнейшей прокатке в валках и выдается из рабочей клетки.

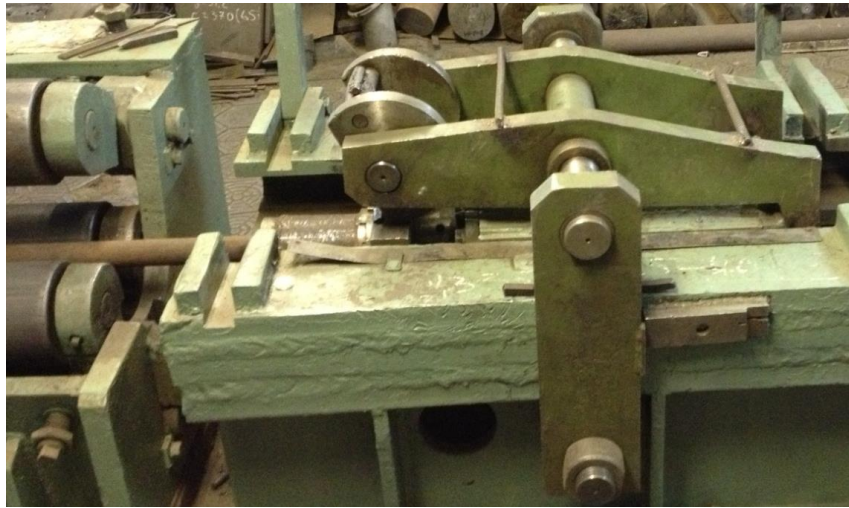


Рисунок 2.5 – Устройство для получения заготовок с дном

Такое исполнение рычажного механизма обеспечивает его высокое быстродействие, так как оно открывается автоматически от усилия металла в процессе его деформирования и позволяет получить заданную глубину каморы.

Для получения заданных геометрических размеров полых заготовок с дном при проведении эксперимента использовалась следующая настройка прошивного стана:

- расстояние между валками в пережиме  $B=26,2$  мм;
- расстояние между линейками  $L=29,5$  мм;
- выдвижение оправки за пережим валков  $C=17$  мм;
- коэффициент овализации  $\xi=1,126$ ;
- угол подачи рабочих валков  $\beta=18^\circ$ ;
- обжатие заготовки в пережиме  $\varepsilon_n=15,5$  %;
- обжатие заготовки перед носком оправки  $\varepsilon_n=12,1$  %.

Время прошивки составляло  $0,8 \dots 1$  с. Процесс прошивки протекал стабильно, в общей сложности было прокатано 300 заготовок. В паузах между прошивками оправка и рабочие валки охлаждались водой в течение  $5 \dots 8$  с. Перед прошивкой на оправку наносилась технологическая смазка в виде смеси машинного масла с добавлением порошкообразного графита. Видимого износа прошивной оправки в процессе эксперимента зафиксировано не было.

В ходе исследований основное внимание уделялось точности геометрических параметров заготовок, в частности разностенности, так как это в большей степени определяет величину припусков на дальнейшую механическую обработку.

Полученные заготовки измеряли с точностью 0,05 мм при помощи электронного штангенциркуля и толщиномера индикаторного типа С-25А. Измерения толщины стенки, наружного и внутреннего диаметров производили на расстоянии 20 мм от переднего торца заготовки (пояс А). Схема измерений основных геометрических параметров полых заготовок представлена на рисунке 2.6.

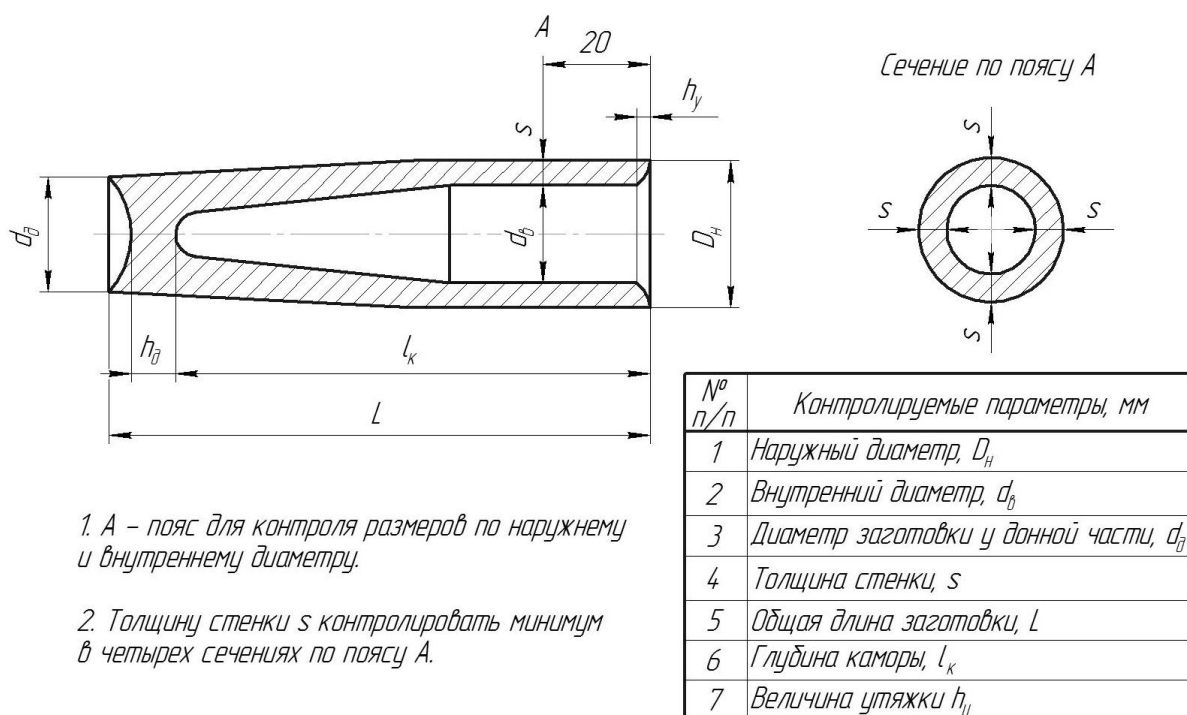


Рисунок 2.6 – Схема измерений геометрических параметров полых заготовок с дном

Абсолютную разностенность рассчитывали как разность между максимальным и минимальным значением толщины стенки.

Внешний вид заготовок после прошивки представлен на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 – Внешний вид прошитых заготовок деталей диаметром 30 мм (а) и продольные темплеты (б)

#### *Прошивка заготовок диаметром 65 мм.*

В качестве материала исходных заготовок использовалась сталь С60. Порезанные и зацентрированные штучные заготовки диаметром 65 мм длиной 170 мм нагревали в камерной электрической печи сопротивления до температуры прокатки 1160 °С в течение 40...50 минут.

Рабочие валки стана имели калибровку, аналогичную применяемой при прошивке заготовок диаметром 31 мм (см. рисунок 2.2).

Для прошивки спроектированы и изготовлены оправки из стали 4Х5МФС диаметром 30 мм с длиной рабочей части 110 мм (рисунок 2.8). Угол конусности рабочей части оправки составляет 5°. Перед прошивкой оправки проходили термообработку в печи в течение 30...35 минут при температуре 900...950 °С.

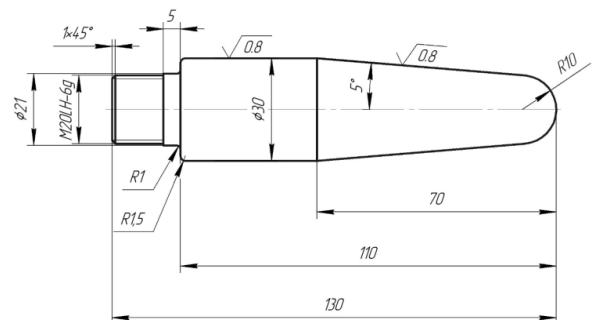


Рисунок 2.8 – Оправка для прошивки заготовок диаметром 65 мм



Во время проведения эксперимента фиксировались геометрические параметры полых заготовок, а также температура и равномерность нагрева перед прошивкой.

В качестве направляющего инструмента использовали линейки из стали 3 с наплавкой наружной поверхности жаропрочным сплавом ЭП-567 (рисунок 2.9).

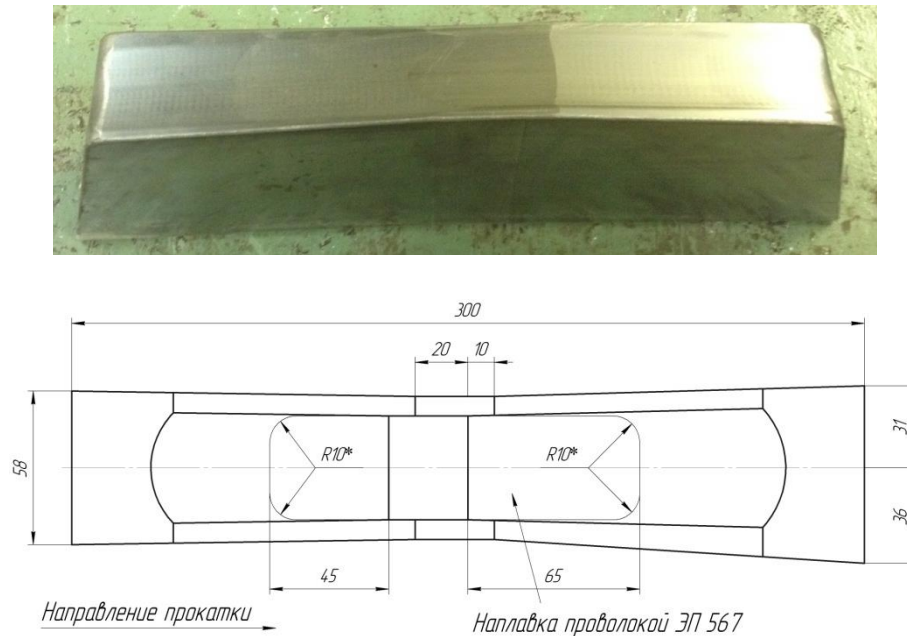


Рисунок 2.9 – Направляющие линейки для прошивки заготовок диаметром 65 мм

Прошивку гильз с дном осуществляли при помощи того же устройства (см. рисунок 2.5), что и прошивку заготовок диаметром 30 мм.

Для получения заданных геометрических размеров использовалась следующая настройка прошивного стана: расстояние между валками в пережиме  $B=57,8$  мм, расстояние между линейками  $L=65$  мм, выдвижение оправки за пережим валков  $C=45$  мм, коэффициент овализации  $\xi=1,125$ , угол подачи рабочих валков  $\beta=18^\circ$ , обжатие заготовки в пережиме  $\epsilon_{\text{п}}=11,08$  %, обжатие заготовки перед носком оправки  $\epsilon_{\text{н}}=5,71$  %.

Время прошивки составляло 1...1,5 с. В паузах между прошивкой рабочий инструмент прошивного стана охлаждался водой, а на оправку наносилась технологическая смазка.

Процесс прошивки протекал стабильно, в общей сложности было получено 35 заготовок. Заметного износа прошивной оправки не зафиксировано.

После прокатки гильзы с дном охлаждали на воздухе, подвергали визуальному осмотру, а затем измеряли основные геометрические параметры. Замеры выполняли по схеме, применявшейся при прокатке заготовок диаметром 30 мм (см. рисунок 2.6).

Внешний вид полученных заготовок и продольный темплет представлены на рисунке 2.10 а, б.



Рисунок 2.10 – Внешний вид прошитых заготовок (а) и продольный темплет заготовки с дном (б) диаметром 65 мм

## 2.2 Анализ точности полых заготовок с дном

Технологические параметры процесса прошивки и геометрические размеры полученных гильз с дном диаметром 30 и 65 мм представлены ниже в таблицах 2.2 и 2.3 (данные представлены для произвольно выбранных 20 шт.).



Таблица 2.2 – Геометрические параметры прошитых полых заготовок с дном диаметром 30 мм\*

№ п/п	Геометрические параметры полученных заготовок, мм										
	Толщина стенки				$\Delta S$	$D_H$	$d_B$	$d_d$	$h_{yt}$	$L$	$l_k$
1	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$							
2	6,0	5,65	5,9	6,0	0,35	32,05...31,64	19,9...19,63	26,27...26,3	4,8	141	124,7
3	5,75	5,9	5,9	6,0	0,25	31,7...31,85	19,82...19,96	26,1...26,25	5,0	141	126
4	5,9	6,05	6,1	5,75	0,3	31,63...32,0	19,6...19,88	26,15...26,28	4,8	140,5	125
5	5,95	5,75	5,95	6,05	0,3	31,66...31,9	19,95...19,6	26,1...26,22	4,9	141,3	125,2
6	5,8	5,8	6,0	5,8	0,2	31,8...31,9	19,77...19,9	26,15...26,25	4,8	141,4	126
7	5,9	5,9	6,05	5,75	0,3	31,58...31,9	19,8...19,95	26,18...26,24	4,9	140,4	127
8	5,75	5,9	5,95	6,1	0,35	31,8...31,92	20,03...19,9	26,13...26,22	5,0	139,8	125,3
9	6,0	6,0	5,65	6,05	0,4	31,74...31,82	20,1...19,9	26,18...26,24	4,8	140,1	125
10	6,1	6,1	5,8	6,0	0,3	31,77...31,95	19,75...20,0	26,1...26,2	4,7	139,7	125,6
11	5,9	5,9	6,0	5,9	0,1	31,75...31,83	19,82...19,89	26,2...26,24	4,8	141,1	125,5
12	5,85	5,95	5,95	6,0	0,15	31,82...31,88	19,79...19,85	26,19...26,24	4,8	140	123,7
13	5,9	5,9	6,0	6,2	0,3	31,72...31,78	19,71...19,79	26,1...26,18	5,0	140,4	123,7
14	5,85	6,0	6,05	6,1	0,25	31,86...31,92	20,05...20,13	26,14...26,26	4,9	140,3	124,6
15	5,8	5,9	6,15	5,9	0,35	31,73...31,88	19,84...20,17	26,05...26,2	4,7	140,6	124,0
16	5,7	6,0	6,0	6,0	0,3	31,67...31,74	19,79...20,0	26,14...26,22	4,5	141	123,6
17	5,9	6,05	5,85	6,0	0,2	31,68...31,74	19,74...19,98	26,12...26,23	4,7	141	125,3
18	5,8	6,05	5,9	5,9	0,25	31,67...31,72	19,8...20,0	26,15...26,22	4,6	141,5	124,3
19	6,0	5,95	6,0	5,8	0,2	31,71...31,8	18,82...20,1	26,1...26,24	4,6	141	125,1
20	6,1	5,9	6,05	6,2	0,3	31,71...31,85	19,65...19,9	26,08...26,13	4,8	139	123,8

\*Примечание: температура прокатки  $T=1150$  °С, настройка прошивного стана:  $B=26,2$  мм,  $L=29,5$  мм,  $C=17$  мм,  $\delta_{оп}=19,5$  мм,  $\xi=1,126$ ,  $\beta=18^\circ$ ,  $\varepsilon_{п}=15,5$  %,  $\varepsilon_{н}=12,1$  %.

Таблица 2.3 – Геометрические параметры прошитых полых заготовок с дном диаметром 65 мм\*

№ п/п	Геометрические параметры полученных заготовок, мм									
	Толщина стенки				$\Delta S$	$D_H$	$d_B$	$h_{yt}$	$L$	$l_K$
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$						
1	16,5	16,9	16,9	16,8	0,4	64,8...64,5	30,4...30,6	9,0	222,3	166
2	16,8	16,8	16,8	16,9	0,1	64,7...64,8	30,7...30,5	8,7	223	165
3	16,9	17,3	16,9	16,5	0,8	64,9...64,85	30,3...30,2	7,9	219,5	165
4	16,6	17,0	17,1	16,6	0,5	64,7...64,85	30,5...30,0	9,0	216,7	166
5	16,6	16,9	16,7	17,0	0,4	64,9...64,76	30,2...30,4	8,5	219	164
6	16,7	17,4	16,7	16,5	0,9	64,98...64,86	30,2...30,8	8,6	219,3	165
7	16,8	16,6	16,8	17,0	0,4	64,93...64,78	30...30,7	9,0	218,5	166
8	16,65	16,9	16,8	16,9	0,25	64,82...65,0	30,2...30,6	9,1	218	166
9	16,6	16,7	16,9	16,9	0,3	64,85...65,0	30,1...30,5	8,8	218	165
10	16,6	16,7	17,0	16,8	0,4	64,55...64,68	30,3...30,27	8,9	220,7	164
11	16,2	16,8	17,0	16,9	0,8	64,9...64,84	30,35...30,46	8,9	217,7	166
12	16,5	16,35	17,3	17,15	0,95	64,75...64,86	30,2...30,5	9,0	222	164
13	17,0	17,2	16,6	16,4	0,8	65...64,85	30,7...30,5	8,5	219	168
14	16,7	17,1	16,95	16,7	0,4	64,8...64,83	30,3...30,2	8,7	220,2	166
15	16,4	16,8	17,1	17,1	0,7	64,86...64,82	30,5...30,15	8,9	220,3	169
16	16,7	16,8	17,2	16,9	0,5	65,0...65,1	30,25...30,34	8,7	216,3	152
17	16,8	16,5	16,95	16,9	0,45	64,93...65,0	30,24...30,44	9,0	220	167
18	16,95	17,2	16,5	16,5	0,7	65,24...65,0	30,7...30,8	9,0	217,2	166
19	17,1	17,1	17,5	17,4	0,4	65,23...65,1	29,8...29,85	8,9	215,8	164
20	16,9	17,2	16,8	16,9	0,4	64,86...64,74	30,6...30,44	8,8	220,4	161

\*Примечание: температура прокатки  $T=1160$  °С, настройка прошивного стана:  $B=57,8$  мм,  $L=65$  мм,  $C=45$  мм,  $\delta_{оп}=30$  мм,  $\xi=1,125$ ,  $\beta=18^\circ$ ,  $\varepsilon_{п}=11,08$  %,  $\varepsilon_{н}=5,71$  %.

На основании данных по замерам геометрических параметров для всех полученных заготовок построены частотные кривые абсолютной разностенности (рисунок 2.11).

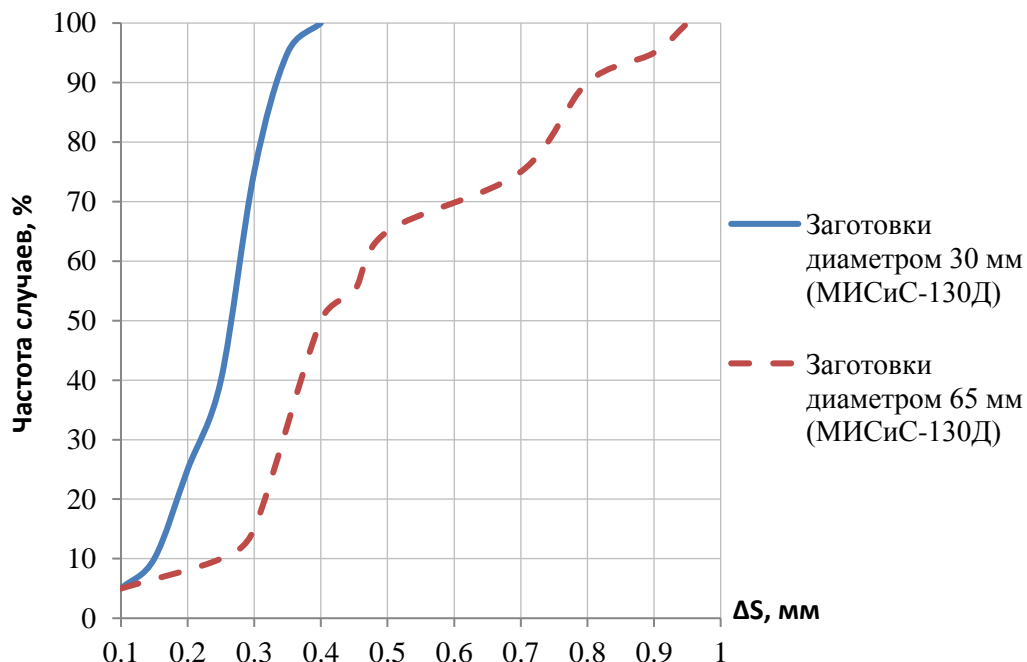


Рисунок 2.11 – Частотные кривые абсолютной разностенности ( $\Delta S$ ) прошитых заготовок с дном диаметром 30 и 65 мм

Анализ полученных данных показал, что партия заготовок диаметром 30 мм имеет разностенность не более 0,4 мм, в то время как для заготовок диаметром 65 мм абсолютную разностенность до 0,4 мм имеют 50 % прошитых гильз из партии. Для 90 % заготовок диаметром 65 мм разностенность не превышает 0,8 мм.

При прошивке в двухвалковом стане винтовой прокатки наблюдается явление самоцентрирования оправочного стержня с оправкой в очаге деформации, что способствует более равномерному формированию стенки гильзы. Однако, как показывают многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, в большинстве случаев решающее влияние на уровень разностенности при прошивке оказывает качество нагрева исходных заготовок.

Проведенные исследования позволили сделать вывод о возможности реализации технологии получения качественных полых заготовок с дном диаметром 30...65 мм на основе процесса горячей винтовой прошивки. Несмотря на то, что в промышленности для производства труб и изделий методом горячей винтовой прошивки наибольшее распространение получили двухвалковые прошивные станы, форма получаемых деталей и жесткие требования по сплошности донной части не позволяют их применения. Как показывают исследования, корректировка параметров настройки прошивного двухвалкового стана (повышение угла подачи, уменьшение овализации очага деформации, снижение обжатия перед носком оправки) не позволяет в полной мере избавиться от вероятности образования несплошности в центральной зоне донной части заготовки, поэтому для прошивки заготовок с дном необходимо применять трехвалковый прошивной стан. Кроме того, исследования, проведенные в МИСиС по сравнению процесса прошивки на двух- и трехвалковых станах позволили сделать вывод, что осуществлять изготовление коротких ( $L/D \leq 9,5$ ) толстостенных ( $5,15 \leq D/S < 6,0$ ) гильз с высоким уровнем точности рекомендуется на трехвалковом стане при значениях угла подачи  $\beta = 9 \dots 12^\circ$  [21].

Полученные данные дают основания для выбора схемы технологического процесса. В частности, измерения полученных гильз с дном показали, что для приближения формы полрой заготовки к форме готового изделия, создания базы для механической обработки и повышения КИМ после прошивки необходимо выполнение операции калибрования полых гильз.

## **Глава 3. Расчет и проектирование оборудования АЛВП**

### **3.1 Выбор технологической схемы**

На основании требований по точности размеров и уровню механических свойств полых заготовок деталей, а также проведенных расчетов и экспериментальных исследований разработана технологическая схема изготовления полых заготовок с дном диаметром 30...60 мм [50], которая включает следующие основные операции:

- резку прутка в холодном состоянии на заготовки мерной длины на ленточных или дисковых пилах;
- механическую зацентровку заготовок в холодном состоянии;
- нагрев заготовок в индукционном нагревателе;
- выдержку заготовок в термостате для выравнивания температуры по поперечному сечению и длине;
- прошивку заготовок в трехвалковом стане винтовой прокатки в полуую гильзу с дном;
- калибрование донной части прошитой гильзы на калибровочном прессе;
- протяжку гильзы с дном через кольца (или кольцо) на пуансоне на калибровочном прессе;
- охлаждение и контроль полученных полых заготовок.

Схема описанного технологического процесса представлена на рисунке 3.1.

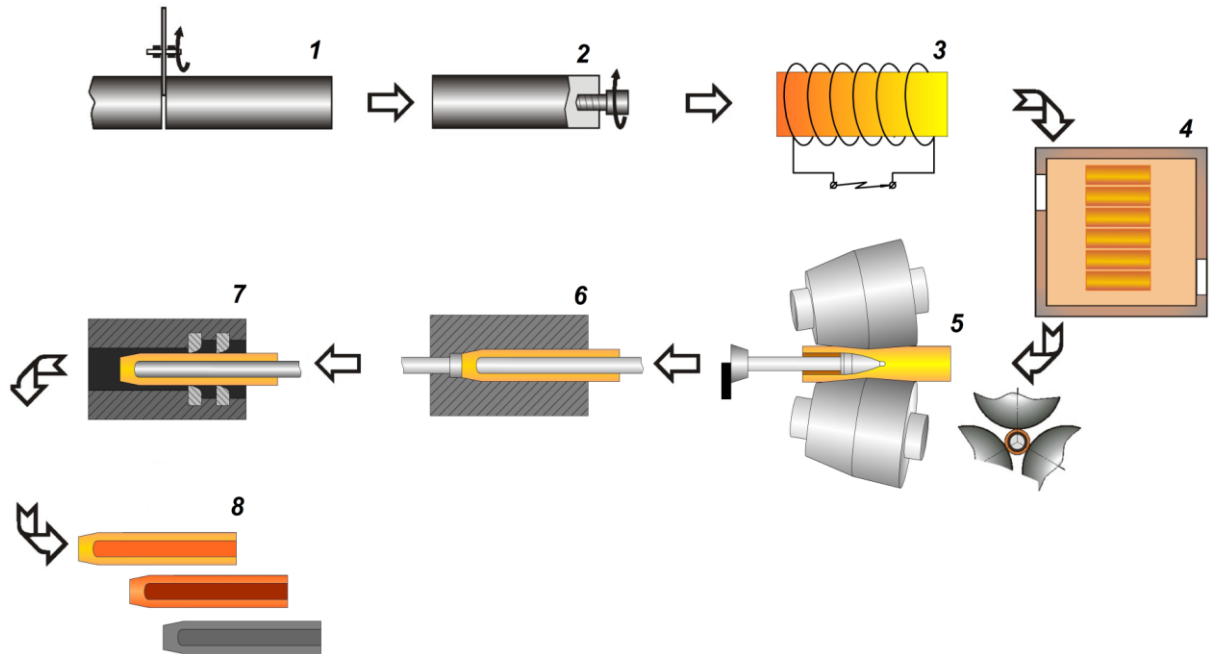


Рисунок 3.1 – Схема технологического процесса получения полых заготовок малого диаметра с дном: 1 – резка прутка на исходные заготовки; 2 – механическая зацентровка; 3 – нагрев исходных заготовок; 4 – выдержка исходных заготовок в термостате; 5 – прошивка в трехвалковом стане винтовой прокатки; 6 – калибрование донной части; 7 – протяжка через кольца; 8 – охлаждение

В предложенной деталепрокатной технологии основной операцией формоизменения является прошивка заготовки в трехвалковом стане винтовой прокатки на оправке, выводимой из очага деформации непосредственно в процессе прокатки для получения дна заданной толщины. Контролируемыми размерами полых заготовок с дном являются: диаметр гильзы и толщина ее стенки, диаметр донной части и толщина дна, общая длина полый заготовки.

Особенности процесса прошивки и конструкция оборудования не позволяет оценить и произвести комплексный анализ всех воздействующих на заготовку факторов. Поэтому для оценки жесткости системы прошивного стана, определения возможности получения необходимой точности геометрических параметров заготовок на разрабатываемом оборудовании и выбора рациональных технологических режимов был проведен пошаговый анализ основных факторов, определяющих точность. При исследовании были применены методы конечно-элементного моделирования с использованием

программных комплексов DeForm 3D и SolidWorks 3D, а также натурные эксперименты.

### 3.2 Расчеты

#### 3.2.1 Расчет энергосиловых параметров процесса прошивки

Основными силовыми параметрами процесса прошивки являются: усилие (сила), действующее на валок, и момент прошивки. Эти параметры определяются в расчете на один валок [51, 52].

Усилие  $P$ , действующее на валок вычисляется как:

$$P = p_{cp} \cdot F, \quad (3.1)$$

где  $p_{cp}$  – среднее нормальное контактное напряжение;

$F$  – площадь контактной поверхности металла с валком.

Для определения среднего нормального контактного напряжения А.И. Целиков рекомендует формулу [53]:

$$p_{cp} = 2 \cdot \sigma_T \cdot \left[ 1,25 \cdot \ln \left( \frac{d_{cp}}{b_{cp}} \right) + 1,25 \cdot \left( \frac{b_{cp}}{d_{cp}} \right) - 0,25 \right], \quad (3.2)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести при данной температуре прокатки.

Расчетная схема действия усилия металла на валки при прошивке изображена на рисунке 3.2.

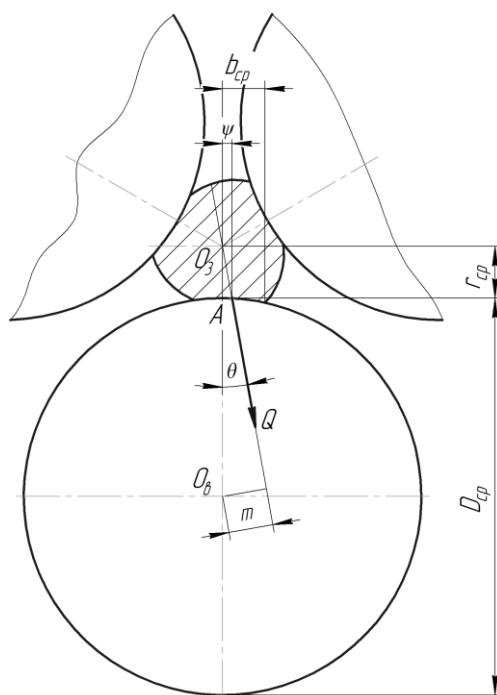


Рисунок 3.2 – Расчетная схема действия усилия металла на валки при прошивке

За сечение приложения усилия  $P$  принимают сечение очага деформации с усредненными размерами. Направление усилия металла на валок отклонено от линии  $O_вO_з$ , соединяющей центры валка и заготовки, на угол  $\theta$  и проходит через ось заготовки. Положение точки  $A$  приложения равнодействующего усилия на дуге захвата усредненного сечения характеризуется коэффициентом плеча  $\psi$ . В практических расчетах принимается  $\psi=0,4\dots0,6$ . С учетом малости угла  $\theta$  момент прошивки, соответствующий данной схеме, составляет:

$$M = \psi \cdot P \cdot b_{cp} \cdot \left( 1 + \frac{D_{cp}}{d_{cp}} \right), \quad (3.3)$$

где  $b_{cp}$  – средняя ширина контактной поверхности;

$\left( \frac{D_{cp}}{d_{cp}} \right)$  – отношение среднего диаметра валка к среднему диаметру заготовки.

Многочисленными экспериментами установлено, что усилия на валки при прошивке зависят от ряда технологических факторов [21, 54-56]. С увеличением диаметра заготовки, скорости и величины деформации усилия возрастают. Понижение температуры нагрева металла также вызывает



увеличение усилий. Усилие на оправку при прошивке составляет 30...45 % от полного усилия металла на валки.

Площади контактной поверхности определены путем измерения пятен контакта на заторможенных в очаге деформации заготовках (рисунок 3.3). Максимальная разница в длине пятен контакта и их общей площади не превышает 5...8 %.

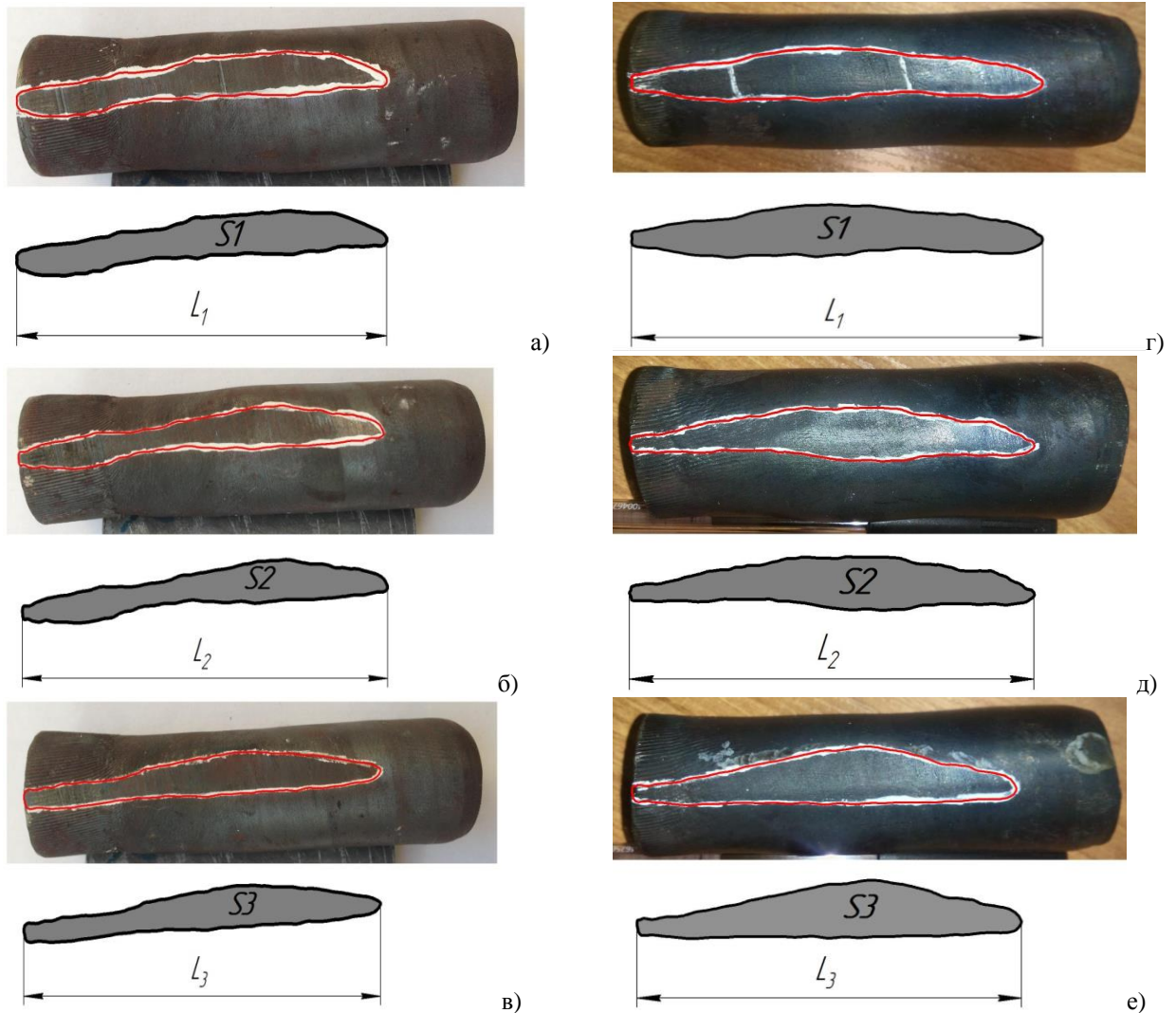


Рисунок 3.3 – К определению площади контактной поверхности металла с валком при прошивке заготовок диаметром 31,5 мм (а-в) и 36 мм (г-е) на трехвалковом стане «30-80»

При расчете усилия использовалась средняя площадь контактной поверхности трех измеренных площадей пятен контакта:

$$F_{cp} = \sum_{i=1}^3 \frac{F_1 + F_2 + F_3}{3}. \quad (3.4)$$

Далее согласно описанной выше методике было определено среднее нормальное контактное напряжение для стали 50, после чего рассчитаны усилие и момент прошивки. Результаты расчета для заготовок диаметром 31,5 и 36 мм сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты расчета энергосиловых параметров прошивки заготовок диаметром 31,5 и 36 мм

Наименование параметра	Значение параметра для заготовки диаметром, мм	
	31,5	36
Температура прошивки $T$ , °C	1150	1150
Среднее нормальное контактное напряжение $p_{cp}$ , МПа (сталь 50)	100	100
Средняя площадь контактной поверхности $F_{cp}$ , мм <sup>2</sup>	686,49	797,64
Усилие прошивки $P$ , кН	68,65	79,76
Момент прошивки $M$ , кН·м	0,26	0,34

Значения усилий, полученных расчетно-экспериментальным методом, сравнивались со значениями усилий, которые определены по результатам моделирования процесса прошивки в DeForm 3D (рисунок 3.4).

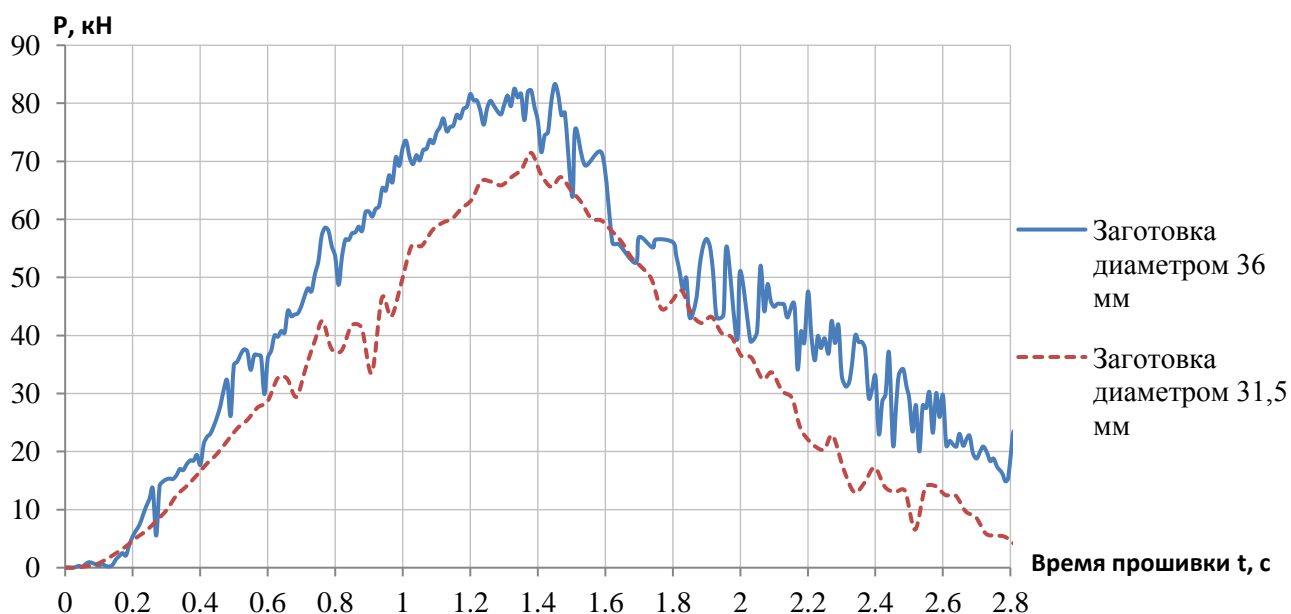


Рисунок 3.4 – Графики изменения осевого усилия металла на валок при прошивке заготовок диаметром 31,5 и 36 мм длиной 85 мм и 70 мм соответственно

Как видно из полученных графиков, при прошивке заготовок практически нет установившегося режима, максимальное усилие возникает спустя 1,3...1,5 с

после захвата металла валками и практически сразу начинает снижаться пропорционально уменьшению площади контакта металла с валком.

Сравнительный анализ показал, что отклонение полученных моделированием значений усилия металла на валок от расчетно-экспериментальных данных не превышает 10 %.

Полученные данные использованы для оптимизации деформационно-скоростных параметров процесса прошивки, расчета и выбора электрооборудования главного привода, а также для проверки и анализа жесткости прошивного стана.

### 3.2.2 Расчет напряжений и деформаций в рабочей клетки прошивного стана с применением МКЭ

Рабочая клеть прошивного стана представляет собой массивную сварную станину коробчатой формы. В сквозных проемах размещаются две кассеты с верхними рабочими валками и кассета с нижним стационарным рабочим валком. Для сведения или разведения верхних валков их кассеты перемещаются при помощи клиньев, соединенных траверсой с вращающимся винтом, который приводится в движение от мотор-редуктора, установленного на станине.

Изменение угла подачи и раскатки в конструкции клетки не предусмотрено, их значения заданы конструктивно, исходя из технологических соображений.

Станина клетки состоит из двух вертикальных плит толщиной 30 мм, которые установлены на основании. Эти плиты воспринимают суммарное усилие прокатки, поэтому от них зависит жесткость конструкции станины (рисунок 3.5).

Для придания жесткости станины плиты усилены ребрами жесткости. Внутри вырезов плит приварены массивные пластины толщиной 70 мм, служащие направляющими для установки кассет валков и клиньев нажимного устройства.

Нижний валок жестко крепится к опорной пластине, поэтому все усилие прокатки передается с нижнего валка на опорную плиту станины.

Для устранения возможных зазоров между кассетой, клиновым механизмом и станиной, каждая верхняя кассета смонтирована на подпружиненных тягах.

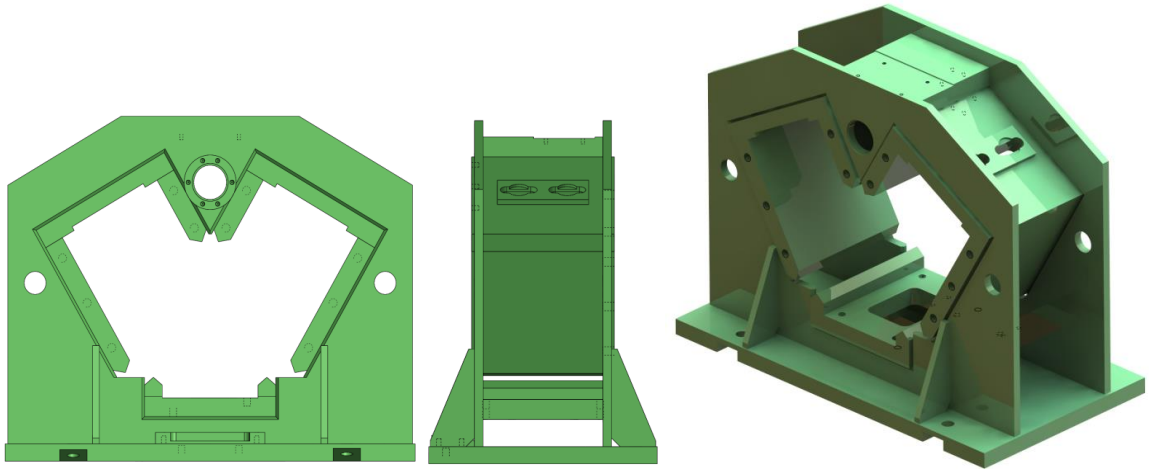


Рисунок 3.5 – Общий вид станины клетки трехвалкового прошивного стана «30-80»

Жесткость рабочей клетки – величина упругой деформации рабочей клетки при прокатке. Она характеризуется модулем жесткости – величиной усилия прокатки, необходимого для единичной деформации. Жесткость рабочей клетки определяет фактические отклонения размеров проката от требуемых, т.е. точность проката, и зависит от жесткости станины, упругости валкового узла, подшипников, нажимного устройства [57-59].

Напряжения и деформации в станине рабочей клетки определяли в программном комплексе SolidWorks Simulation в соответствии с методиками, изложенными в работах [60-63].

Для определения полной картины напряженно-деформированного состояния рабочей клетки, расчет проводился в контексте сборки клетки прошивного стана. После проектирования в программе была построена 3D модель рабочей клетки прошивного стана (рисунок 3.6).

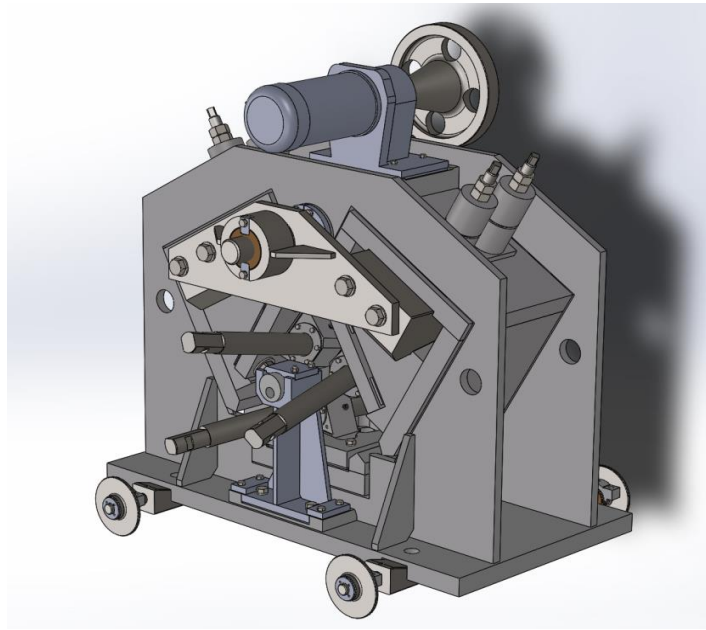


Рисунок 3.6 – 3D модель рабочей клетки прошивного стана «30-80»

Для каждой детали из библиотеки САПР-программы определен материал: станина изготовлена из стали Ст3, рабочие валки – из стали 35ХМ, подшипники – из бронзы БрА10ЖЗМц2 и т.д. Перед расчетом из общей сборки исключены функционально незначимые элементы и вырезы (крепёж, планки, проводка и др.), после чего клеть приняла вид, представленный на рисунке 3.7. Такая аппроксимация проводится в первую очередь для освобождения мощностей компьютера от излишнего объема данных, влияние которых на общую картину напряжённо-деформированного состояния крайне незначительно.

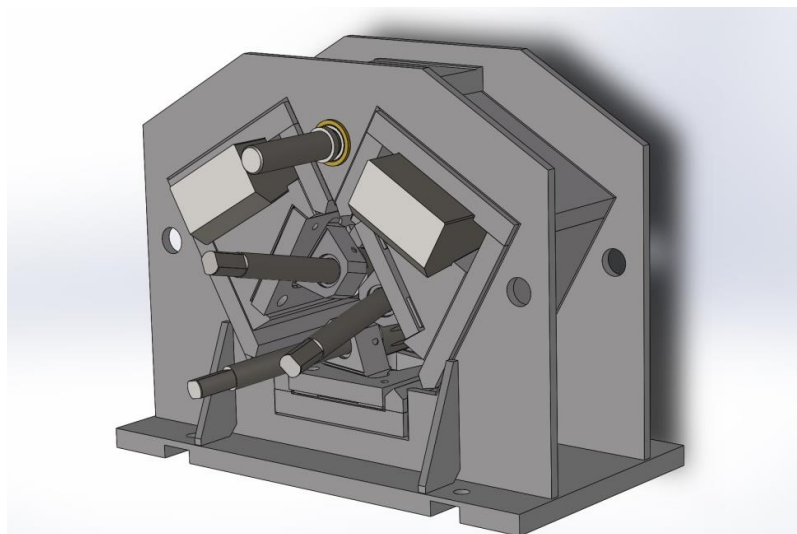


Рисунок 3.7 – Вид рабочей клетки для расчета

Следующей операцией является создание наборов контактов деталей внутри клетки. Часть из них определяется глобальным контактом (предполагается, что сопряженные детали связаны), а другой части назначаются наборы контактов, характеризующие параметры трения между деталями.

Далее определяются крепления модели в пространстве. Клеть устанавливается основанием на раму и жестко крепится к ней болтами, т.е. основание имеет жесткую заделку (рисунок 3.8).

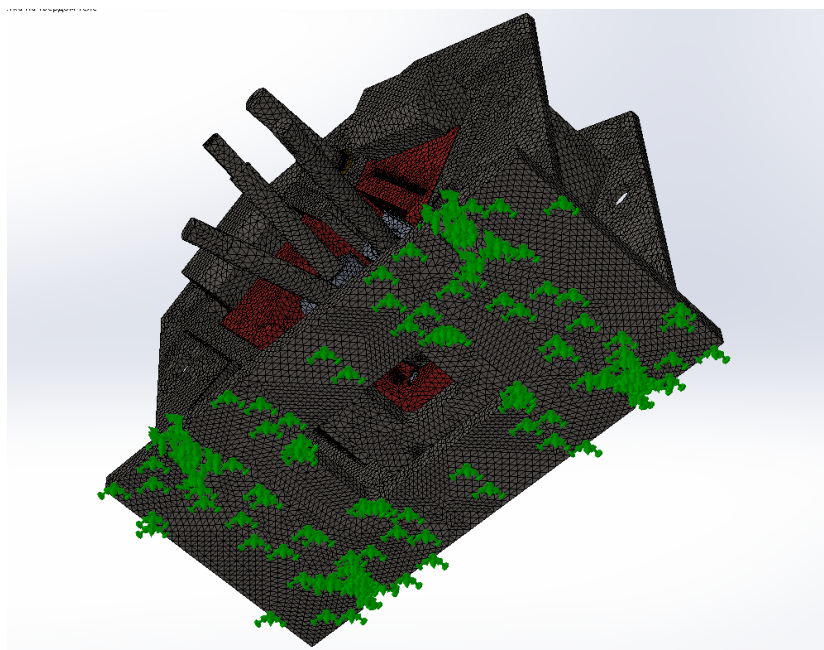


Рисунок 3.8 – Фиксация основания рабочей клетки в пространстве

Далее к рабочим валкам прикладывается нагрузка в виде момента (рисунок 3.9, а) и силы, с которой заготовка действует на валки (рисунок 3.9, б). Расчетное максимальное радиальное усилие, действующее на валки при прошивке заготовки диаметром 60 мм составляет 150 кН, максимальный момент – 0,63 кН·м.



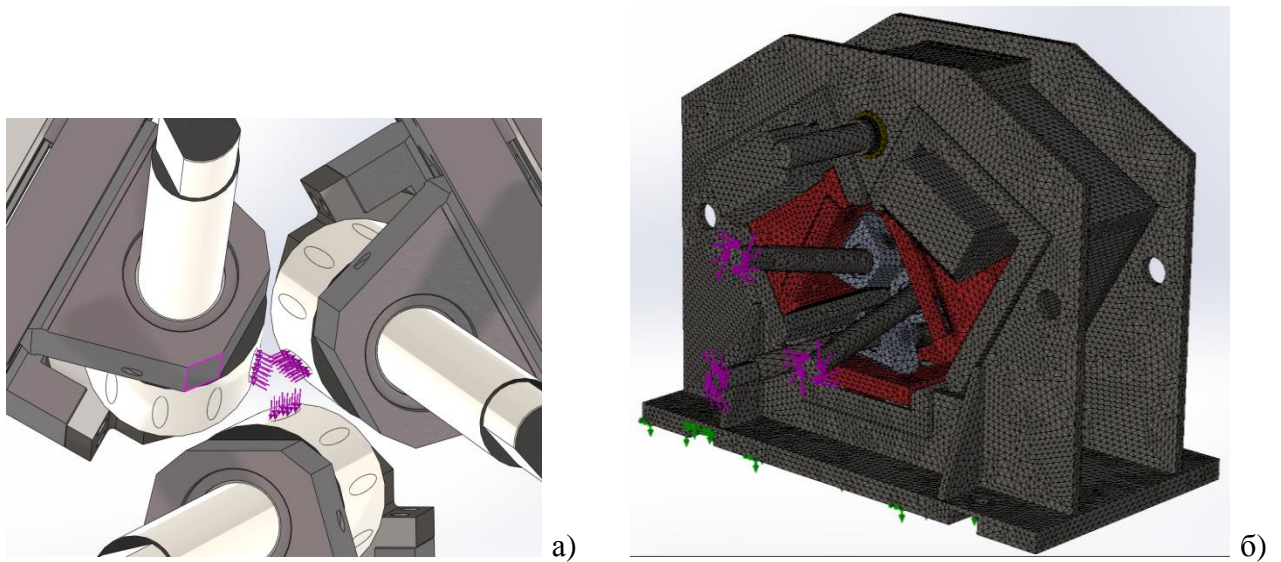


Рисунок 3.9 – Приложение усилия (а) и момента (б) к рабочим валкам

На последнем этапе расчетной модели задается сетка конечных элементов (рисунок 3.10).

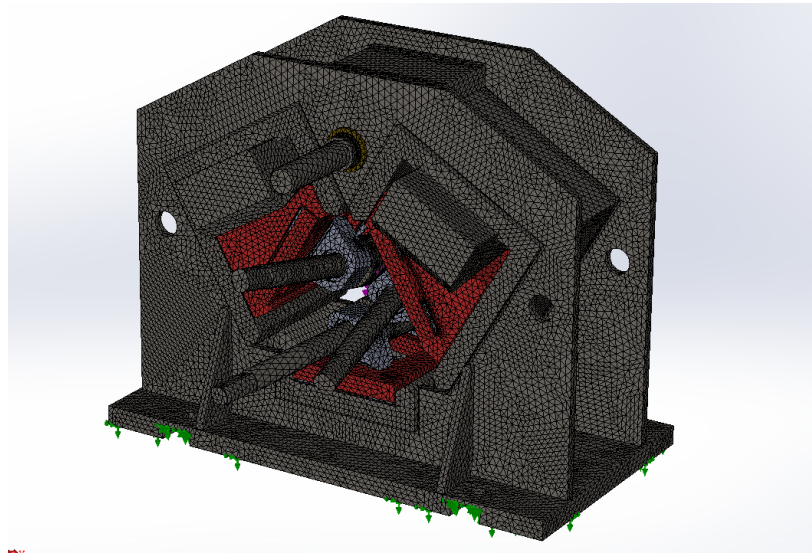


Рисунок 3.10 – Конечно-элементная модель рабочей клетки

После всех операций по заданию начальных условий виртуального эксперимента, выполняется расчет конструкции. В результате расчета получены эпюры напряжений (рисунок 3.11) и абсолютных перемещений рабочей клетки (рисунок 3.12).

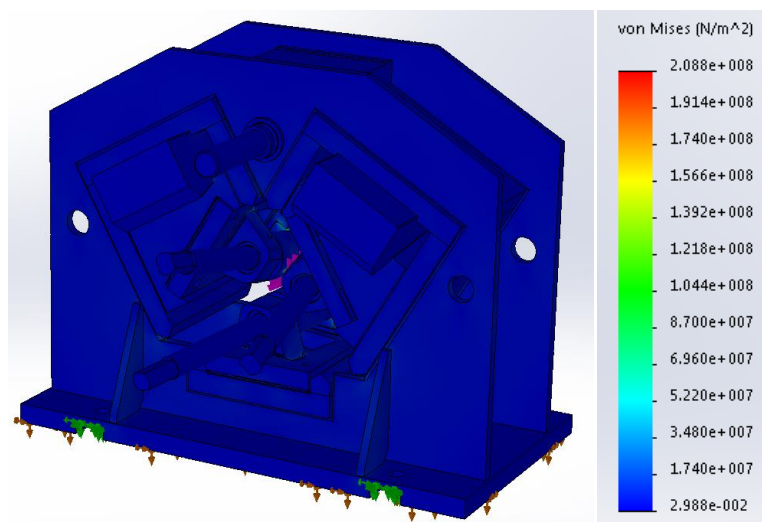


Рисунок 3.11 – Эпюра напряжений в рабочей клетке прошивного стана

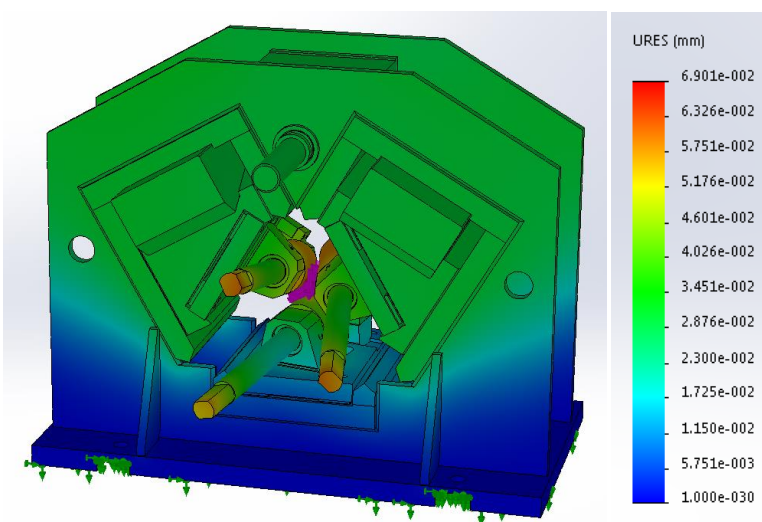


Рисунок 3.12 – Эпюра абсолютных перемещений рабочей клетки прошивного стана

В результате проведенного виртуального эксперимента были получены данные, опираясь на которые можно произвести коррекцию модели на этапе проектирования.

Как видно из полученных данных, максимальные напряжения возникают в бочке вала и составляют 209 МПа. Эти значения в 4,5 раза меньше предела прочности для стали 35ХМ (930 МПа) [64]. Напряжения в станине клетки составили 17,4 МПа, что также значительно меньше предела прочности для материала станины (570 МПа для стали Ст3) [64].

Максимальные перемещения под действием нагрузки составляют 0,07 мм и возникают на валке в месте приложения нагрузки. Это значение находится в



пределах допуска на диаметральные размеры полых заготовок диаметром 60 мм. Для станины максимальное перемещение составляет под нагрузкой 0,03 мм и возникает в верхней ее части. Таким образом, коэффициент жесткости калибра составит:

$$c_k = \frac{P_{\max}}{\Delta_{\max}} = \frac{0,15}{0,07} = 2,14 \left( \frac{MH}{мм} \right). \quad (3.5)$$

Результаты проведенного виртуального эксперимента свидетельствуют о том, что клеть имеет достаточный запас прочности. Расчетная жесткость калибра обеспечивает получение полых заготовок с диаметральными размерами высокой точности.

### 3.2.3 Анализ устойчивости оправочного стержня

Деформированное состояние оправочного стержня под нагрузкой может быть устойчивым или неустойчивым. Если вывести стержень из первоначального состояния дополнительной поперечной смещающей силой  $N$ , то он окажется искривлённым. После удаления силы  $N$  стержень либо возвращается в первоначальное прямолинейное состояние, либо остаётся искривлённым. Первый случай соответствует устойчивому деформированному состоянию стержня, второй случай – неустойчивому деформированному состоянию.

Наибольшая величина сжимающей силы, при которой деформированное состояние стержня ещё устойчивое, называется критической силой, обозначаемой  $F_k$ . Превышение величины критической силы приводит к потере устойчивости, при которой малые поперечные нагрузки приводят к большим изгибным перемещениям стержня и возможному его разрушению.

Отношение критической силы к площади поперечного сечения стержня называют критическим напряжением  $\sigma_k$ , которое вычисляется по формуле:

$$\sigma_k = \frac{F_k}{A}, \quad (3.6)$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения стержня.

В том случае, когда критические напряжения не превышают предела пропорциональности материала  $\sigma_{nc}$ , потеря устойчивости начинается при упругом деформировании стержня и критическую силу вычисляют по формуле Эйлера:

$$F_{\kappa} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(\mu \cdot l)^2}, \quad (3.7)$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;

$I$  – момент инерции, мм<sup>4</sup>;

$\mu$  – коэффициент приведения длины стержня, зависящий от способов закрепления концов стержня. Для консольного закрепления  $\mu=2$ ;

$l$  – геометрическая длина стержня.

Произведение  $\mu \cdot l$  называется приведённой длиной стержня.

Для сжатых стержней вводится безразмерная характеристика, называемая гибкостью  $\lambda$ , которая определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i}, \quad (3.8)$$

где  $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$  – радиус инерции поперечного сечения стержня, мм;

$A$  – площадь поперечного сечения стержня, мм<sup>2</sup>.

Формула Эйлера справедлива при условии:

$$\lambda \geq \lambda_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{nc}}}. \quad (3.9)$$

Результаты расчета критической силы для оправочных стержней, использованных при прошивке заготовок диаметром 31,5 и 36 мм представлены в таблице 3.2.

Максимальные значения осевого усилия на оправку при прошивке заготовок диаметром 31,5 и 36 мм получены при выполнении компьютерного моделирования процесса прошивки в программном комплексе DeForm 3D и составляют 20 и 25 кН соответственно. Как видно из результатов расчета, эти

усилия значительно меньше критической силы  $F_k$ , следовательно, условие устойчивости выполняется.

Таблица 3.2 – Результаты расчета устойчивости оправочного стержня

Наименование параметра	Стержень для прошивки заготовок диаметром 31,5 мм	Стержень для прошивки заготовок диаметром 36 мм
Материал стержня	Сталь 4Х5МФС	
Предел пропорциональности материала $\sigma_{пл}$ , МПа	1480	
Модуль упругости материала стержня $E$ , МПа	210000	210000
Момент инерции $I$ , мм <sup>4</sup>	9725	11712,8
Коэффициент приведения длины стержня $\mu$	2	
Длина консольной части стержня $l$ , мм	310	300
Диаметр стержня $d$ , мм	21	22
Площадь поперечного сечения стержня $A$ , мм <sup>2</sup>	346,2	379,9
Радиус инерции поперечного сечения стержня $i$ , мм	5,30	5,55
Гибкость стержня $\lambda$	116,98	108,06
Гибкость $\lambda_0$	37,40	37,40
Критическая сила $F_k$ , кН	52,38	67,37

### 3.2.4 Виртуальное исследование деформаций оправки и стержня

Развитие компьютерных технологий дает возможность широкого использования специализированных пакетов программ для моделирования процессов ОМД, основанного на методе конечных элементов (МКЭ). Моделирование позволяет значительно упростить разработку новых процессов и оборудования, исследования формоизменения металла, прогнозирование силовых и деформационных характеристик процесса. Многочисленные исследования, проведенные МКЭ моделирования с использованием коммерческого программного обеспечения (MSC SuperForm, Deform 3D, QForm-3D) показали, что применение МКЭ дает достоверные эффективные результаты по формоизменению металла [65-67].

Отклонение оправки и оправочного стержня  $\Delta_{см}$  в общем случае вызвано совокупным действием продольной силы  $Q$ , действующей на носик оправки, и поперечной смещающей силы  $N$ , действующей в плоскости, перпендикулярной

оси оправочного стержня с оправкой [21]. В данном случае, для определения смещающих сил, оправочный стержень вместе с оправкой можно рассматривать по схеме, представленной на рисунке 3.13. Распределенный момент на поверхности оправки, создаваемый заготовкой во время прошивки не учитывается.

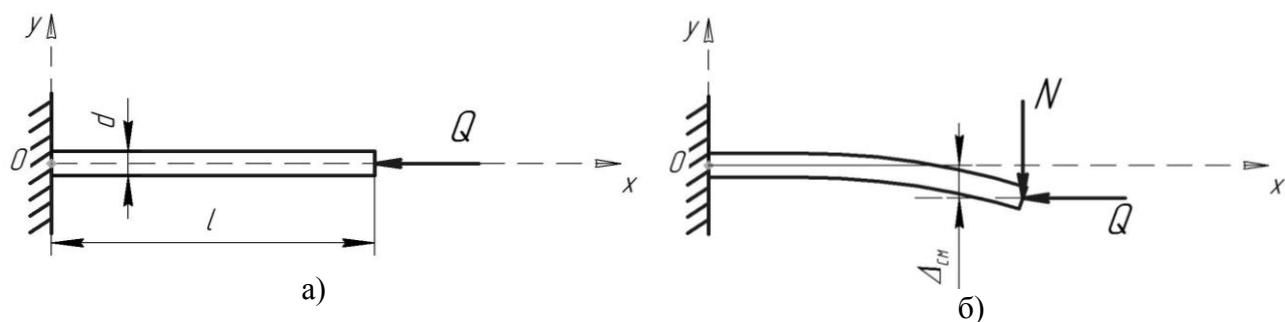


Рисунок 3.13 – Состояние оправочного стержня:

а – исходное; б – стержень дополнительно нагружен смещающей силой N

С целью определения особенностей процесса прошивки коротких полых заготовок малого диаметра, выявления характера образования разностенности и получения полуфабрикатов деталей повышенной точности (с относительной разностенностью  $\Delta S \leq 6\%$ ) был проведен анализ устойчивости положения оправки в очаге деформации и оправочного стержня при прошивке заготовок диаметром 31,5 мм. Получена партия полых заготовок, проведен сравнительный анализ точности полученных заготовок и максимальной величины отклонения носика оправки от оси прошивки.

Специфика процесса прошивки и конструкция оборудования не дает возможности измерить действующие на оправку силы или фактическое отклонение оправки в очаге деформации путем установки измерительной аппаратуры, поэтому для определения смещающих сил, действующих в очаге деформации, было проведено моделирование процесса прошивки в программном комплексе Deform 3D.

Очаг деформации трехвалкового прошивного стана образован рабочими валками 1 и оправкой 2, закрепленной в оправочном стержне 3. Схема очага деформации министана представлена на рисунке 3.14.

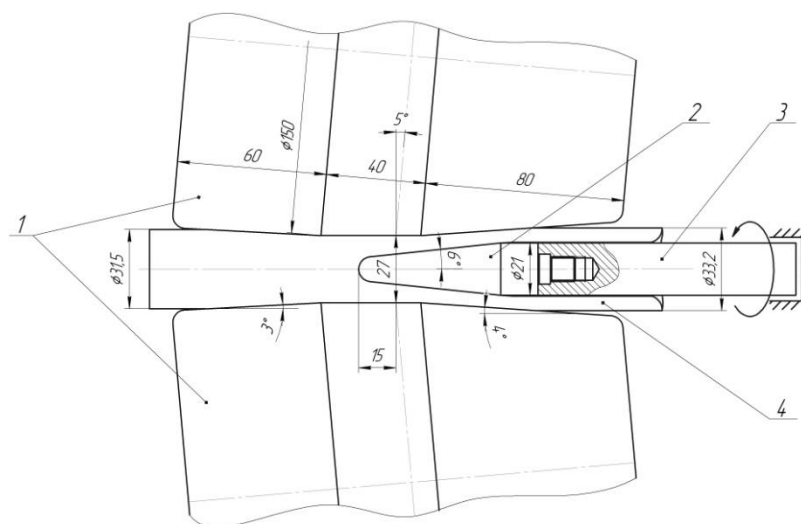


Рисунок 3.14 – Схема очага деформации трехвалкового прошивного стана:  
1 – валки; 2 – оправка; 3 – оправочный стержень; 4 – заготовка

Исходные данные для моделирования приведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Исходные данные для моделирования прошивки полых заготовок диаметром 31,5 мм в Deform 3D

Параметр	Значение параметра
Размеры исходной заготовки, мм:	
диаметр	32
длина	85
диаметр зацентровки	12
глубина зацентровки	5
Материал заготовки	Сталь 45
Температура нагрева заготовки, °C	1150
Материал рабочих валков	Сталь 35ХН
Частота вращения рабочих валков, мин <sup>-1</sup>	60
Материал оправочного стержня и оправки	Сталь 4Х5МФС
Температура окружающей среды, °C	20
Приращение по времени, с	0,003
Количество элементов в сетке заготовки, шт.	90000
Показатель трения:	
между заготовкой и валками	2
между заготовкой и оправкой	0,7
Коэффициент теплообмена между инструментом и заготовкой, Вт/м <sup>2</sup> ·К	5

Температура инструмента принята равной температуре окружающей среды.

Скорость вращения оправки с оправочным стержнем принята равной скорости вращения заготовки во время прошивки в том же направлении.

Скольжение заготовки относительно валков в очаге деформации при моделировании не учитывалось.

По результатам моделирования построены графики зависимости смещающей поперечной силы  $N$ , осевой сжимающей силы  $Q$  и усилия металла на валок  $P$  от времени прошивки (рисунок 3.15). Все графики аппроксимированы в программе MS Excel полиномиальной функцией 6 степени.

Для анализа полученных данных машинное время прошивки было условно разделено на 4 стадии:

- 1) время первичного захвата (захват заготовки валками и обкатка ее до встречи с оправкой);
- 2) время от начала контакта заготовки с носиком оправки до окончания прошивки заготовки на глубину зацентровки;
- 3) время прошивки и раскатки заготовки на оправке;
- 4) время отвода оправки и стержня из очага деформации.

Анализ очага деформации и стадий прошивки показал, что практически весь процесс протекает в неустановившемся режиме (длина очага деформации сопоставима с длиной заготовки). При этом первой стадии соответствует временной промежуток от 0 до 0,64 с, в течение которого происходит захват заготовки валками и обжатие ее по диаметру. На этом этапе силы со стороны заготовки на оправку не действуют, а усилие на валки  $P$  изменяется практически по линейному закону и возрастает пропорционально увеличению площади контактной поверхности металла с валком до значения порядка 27 кН (на один валок).

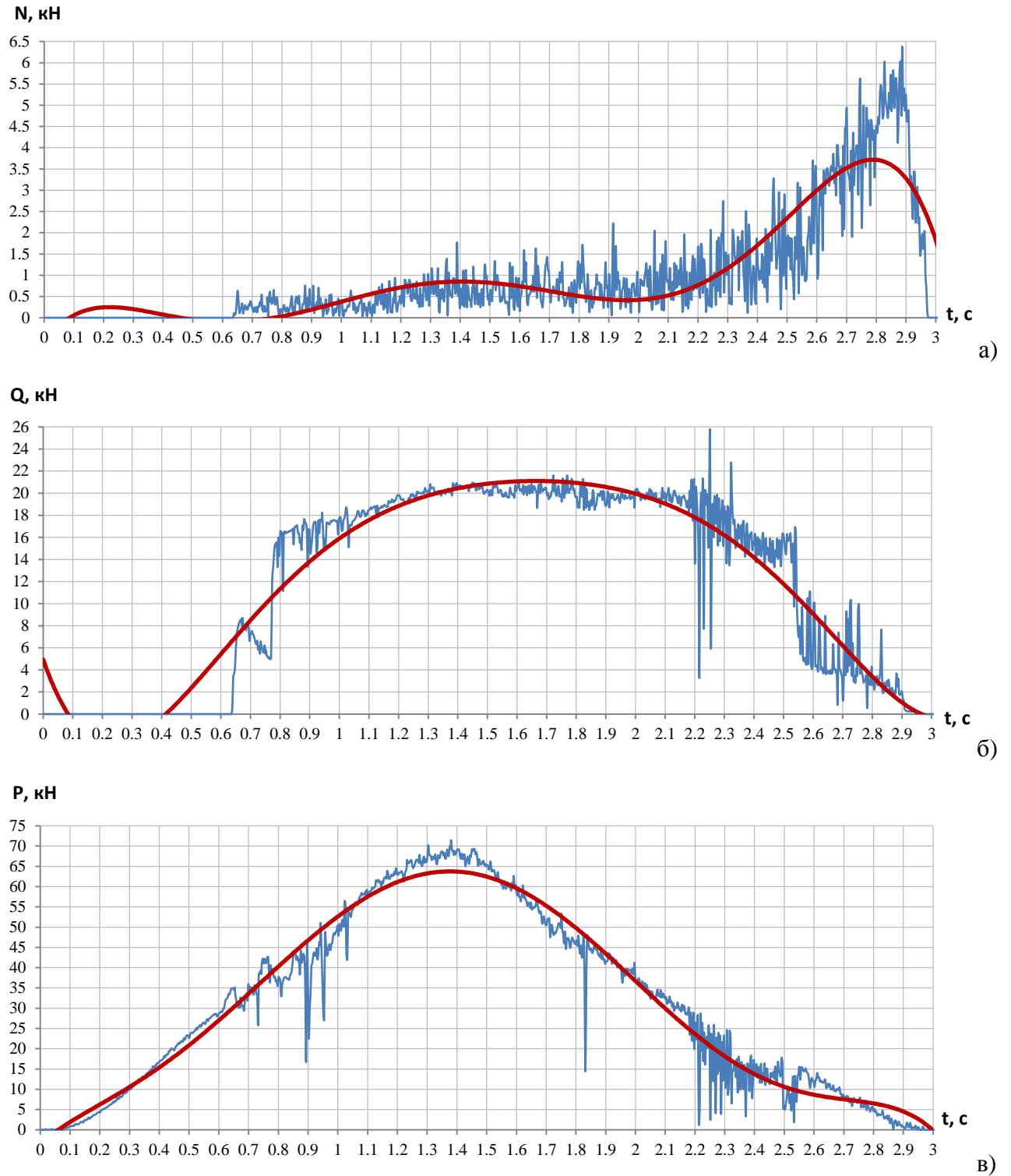


Рисунок 3.15 – График зависимости смещающей поперечной силы  $N$  (а), осевой сжимающей силы  $Q$  (б) и усилия металла на валок  $P$  (в) от времени прошивки

Второй стадии процесса прошивки соответствует временной отрезок равный 0,14 с. На этом этапе происходит касание зацентрированного торца заготовки носика оправки, чем обусловлен резкий рост осевого усилия на

оправку  $Q$  и появление поперечной смещающей силы  $N$ ; при этом усилие на валок  $P$  продолжает возрастать, но имеет менее стабильный характер из-за появления сил, действующих в радиальном направлении. Так как прошивка на глубину зацентровки происходит при неполном контакте носика оправки с металлом, значение осевой силы  $Q$  после первоначального контакта снижается с 8,5 до 4,5 кН.

На третьей стадии происходит формирование полости заготовки путем раскатки ее на оправке в течение 1,76 с. В промежутке времени от 0,78 до 2,18 с поперечная смещающая сила  $N$  плавно возрастает до среднего значения 1 кН и имеет относительно стабильный характер. Осевое усилие  $Q$  вначале резко возрастает до 16 кН из-за увеличения площади контакта носика оправки с заготовкой, затем происходит увеличение площади контакта металла с оправкой на ее раскатном участке ( $Q$  плавно возрастает от 16 до 20 кН), после чего усилие до окончания формирования полости остается в среднем на уровне 20 кН. Усилие металла на валок достигает максимума в середине третьей стадии процесса и составляет в этот момент времени 67...70 кН. После этого происходит снижение усилия на валки пропорционально уменьшению площади контактной поверхности валков и заготовки. Далее, начиная от 2,18 до 2,54 с на всех трех графиках можно отметить более выраженные отклонения усилий от средних значений, что вероятно связано с началом контактирования гильзы с выходной проводкой, установленной на выходе из валков.

Последняя условно выделенная стадия прошивки длится приблизительно от 2,54 до 3 с. В течение этого времени начинается отвод оправочного стержня с оправкой из очага деформации для формирования полой заготовки с дном. На данном участке происходит резкий рост поперечной силы  $N$  до значений 5,5...6 кН. Это можно объяснить тем, что площадь контакта гильзы с рабочими валками приближается к минимальному значению, а длина свободного переднего конца гильзы увеличивается, что приводит к неустойчивому положению заготовки в очаге деформации. Осевое усилие снижается и имеет значительные колебания из-за частичного контакта внутренней поверхности



каморы гильзы с оправочным стержнем во время его отвода, а усилие на валки плавно уменьшается до нуля к моменту выхода заготовки из валков.

Описанные выше изменения силовых характеристик в процессе моделирования прошивки заготовок диаметром 31,5 мм показывают, что в неустановившемся режиме колебания сил, действующих на оправку со стороны прошиваемой заготовки имеют достаточно большие пределы отклонений, однако образование разностенности возможно только на второй и третьей стадиях прошивки, когда происходит формирование полости гильзы. В связи с этим, значения усилий, возникающие на всех остальных выделенных стадиях прошивки, для дальнейшего определения отклонения оправки и стержня не учитывались.

С целью определения максимальной величины отклонения носика оправки от оси прошивки выполнен расчет напряжений и деформаций в программе SolidWorks 3D. Для этого, вначале была построена 3D модель оправки с оправочным стержнем, зафиксированном в свободновращающемся шпинделе. Затем для каждой детали из библиотеки программы выбран материал: сталь 40ХН для шпинделя и 4Х5МФС для оправочного стержня с оправкой. При расчете оправка и оправочный стержень рассматривались как одна деталь.

Следующей операцией является определение способа закрепления стержня и приложения нагрузок. Согласно принятой схеме (см. рис. 3.13), шпиндель, в котором закреплен стержень, имеет жесткую заделку, а точкой приложения сил является точка, расположенная на носике оправки по продольной оси стержня (рис. 3.16, а, б). Консольная часть оправки имеет длину 310 мм.

Основываясь на результатах моделирования прошивки, максимальное осевое усилие  $Q$  на стадии формирования стенки полый заготовки составляет порядка 20 кН, а поперечная смещающая сила  $N$  находится в пределах 1 кН.

Последним этапом перед началом расчета является создание сетки конечных элементов для модели (рис. 3.16, в).

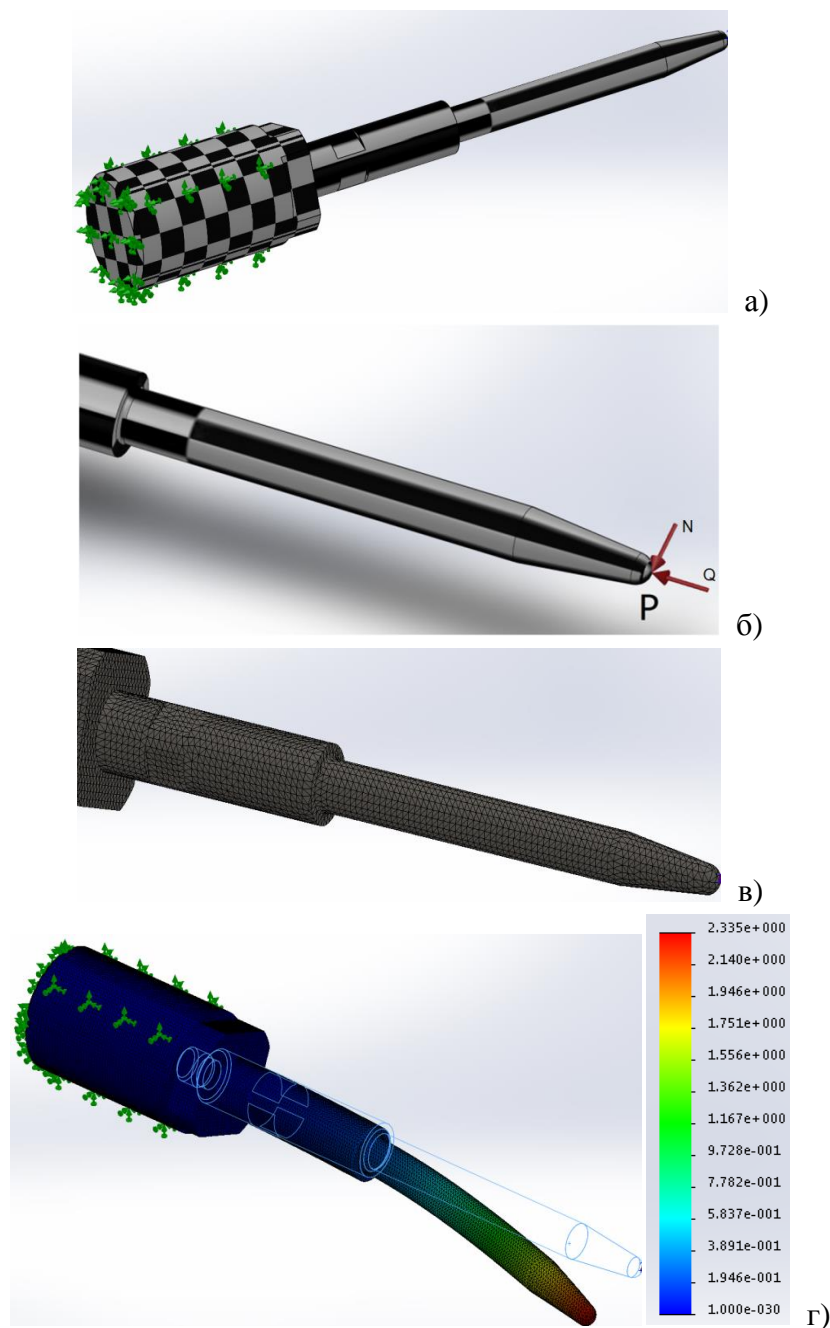


Рисунок 3.16 – Этапы расчета напряжений и деформаций оправочного стержня в SolidWorks 3D: а – создание способа заделки оправочного стержня с оправкой; б – приложение нагрузок в заданной точке Р; в – создание сетки конечных элементов; г – эпюра абсолютных перемещений оправки и оправочного стержня

После создания сетки выполнялся расчет, результатом которого является эпюра абсолютных перемещений оправки и оправочного стержня (рис. 3.16, г).

В результате проведенного виртуального эксперимента установлено, что под действием сил, действующих на оправку и стержень во время прошивки, максимальное отклонение носика оправки от своей оси (и оси прошивки) может

достигать 0,23 мм. Кроме того, стоит учитывать зазоры в подшипниках шпинделя упорной головки, в которой установлена оправка и стержень (~ 0,01 мм), а также биение инструмента при его изготовлении (~ 0,05 мм). Поэтому искомое максимальное отклонение носика оправки  $\Delta_{см}$  следует рассматривать как сумму этих трех возможных отклонений, то есть  $\Delta_{см}=0,29$  мм.

По аналогичной методике определялось максимальное отклонение носика оправки под действием смещающей и осевой сил при прошивке заготовок диаметром 36 мм. В SolidWorks 3D построена трехмерная модель оправки, державки и шпинделя и заданы исходные параметры (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Исходные данные для компьютерного анализа перемещений оправки

Наименование параметра	Значение
Материал оправки	ЭИ-131
Материал державки (оправочного стержня)	Сталь 4Х5МФС
Материал шпинделя	Сталь 40ХН
Длина консольной части оправки и стержня, мм	300
Диаметр оправки и державки, мм	22
Осевая сила Q, кН	24
Смещающая сила N, кН	1

Результатирующая эпюра максимального смещения носика оправки представлена на рисунке 3.17.

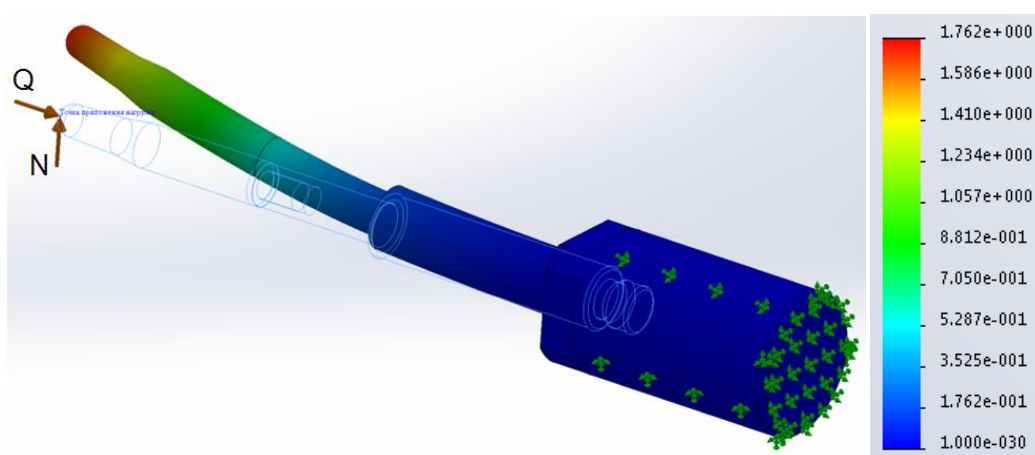


Рисунок 3.17 – Эпюра абсолютных перемещений оправки и оправочного стержня для прошивки заготовок диаметром 36 мм

Проведенный расчет показал, что под действием сил, действующих на оправку и стержень в очаге деформации, максимальное отклонение носика оправки может составлять 0,176 мм. Принимая во внимание неточность изготовления инструмента и зазоры в конструкции упорной головки аналогично примеру, описанному выше, получим, что максимально возможное смещение носика оправки от оси прошивки  $\Delta_{\text{см}}$  может составлять 0,236 мм.

### 3.2.5 Компьютерное моделирование процесса охлаждения заготовок малого диаметра

В разрабатываемой технологии получения полых заготовок с дном диаметром 30...60 мм одной из важнейших операций является нагрев, так как для реализации всех технологических операций с одного нагрева и получения, при этом, точных геометрических размеров необходимо знать время, в течение которого это является возможным. Данный вопрос актуален, в первую очередь, ввиду малых размеров заготовок.

При проектировании и компоновке оборудования также необходимо знать время охлаждения, чтобы обеспечить требуемое быстроедействие системы оборудования и транспортных устройств.

Для решения данной задачи было проведено компьютерное моделирование процесса охлаждения заготовок в среде моделирования DeForm 3D.

В качестве исходных были выбраны заготовки из стали 50 диаметром 31,5 мм, 36 мм и 60 мм и длиной 85 мм, 70 мм и 100 мм соответственно.

Начальная температура заготовок перед прошивкой выбрана  $T_0=1150$  °С. Минимально допустимая температура заготовок перед прошивкой выбрана  $T_{\text{min}}=1120...1130$  °С исходя из физико-механических свойств материала и опытных данных, которые показывают повышенный износ инструмента и нагрузки при прошивке заготовок с температурой ниже данного уровня.

Температура окружающей среды  $T_{о.с.}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , коэффициент конвекции при охлаждении на воздухе без нагнетания  $\alpha=20\text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ .

Температура контролировалась на боковой поверхности заготовок на расстоянии половины длины от торца (точка Р1) и на поверхности торца заготовки со стороны зацентровочного углубления (Точка Р2).

Результаты проведенного моделирования для заготовок трех типоразмеров представлены в таблице 3.5 и на рисунках 3.18-3.20.

Таблица 3.5 – Температура поверхности заготовок диаметром 31,5, 36 и 60 мм после нагрева в зависимости от времени охлаждения на воздухе

Время, с	Геометрические размеры исходной заготовки D×L, мм					
	31,5×85		36×70		60×100	
	Точка Р1 (Боковая пов- ть заготовки)	Точка Р2 (Торец заготовки)	Точка Р1 (Боковая пов- ть заготовки)	Точка Р2 (Торец заготовки)	Точка Р1 (Боковая пов- ть заготовки)	Точка Р2 (Торец заготовки)
0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0
0,1	1144,6	1144,8	1144,8	1144,6	1145,7	1145,0
0,2	1142,2	1142,6	1142,4	1142,5	1142,9	1142,7
0,3	1140,2	1140,6	1140,5	1140,5	1141,0	1140,9
0,4	1138,6	1138,8	1138,9	1138,8	1139,4	1139,5
0,5	1137,1	1137,1	1137,4	1137,1	1138,0	1138,2
0,6	1135,8	1135,4	1136,1	1135,5	1136,7	1137,0
0,7	1134,6	1133,8	1134,9	1133,9	1135,6	1135,9
0,8	1133,5	1132,2	1133,8	1132,4	1134,6	1134,9
0,9	1132,4	1130,6	1132,7	1130,9	1133,6	1134,0
1,0	1131,4	1129,1	1131,7	1129,4	1132,6	1133,1
1,1	1130,4	1127,6	1130,7	1127,9	1131,7	1132,2
1,2	1129,4	1126,1	1129,8	1126,4	1130,9	1131,4
1,3	1128,5	1124,6	1128,9	1125,0	1130,1	1130,5
1,4	1127,7	1123,2	1128,1	1123,6	1129,3	1129,7
1,5	1126,8	1121,8	1127,2	1122,2	1128,5	1128,9
1,6	1126,0	1120,4	1126,4	1120,9	1127,8	1128,1
1,7	1125,2	1119,0	1125,7	1119,5	1127,0	1127,4
1,8	1124,4	1117,7	1124,9	1118,2	1126,3	1126,6
1,9	1123,7	1116,3	1124,1	1116,9	1125,6	1125,8
2,0	1122,9	1115,0	1123,4	1115,7	1125,0	1125,1
2,1	1122,2	1113,7	1122,7	1114,4	1124,3	1124,4
2,2	1121,5	1112,5	1122,0	1113,2	1123,7	1123,6
2,3	1120,8	1111,2	1121,3	1111,9	1123,1	1122,9
2,4	1120,1	1110,0	1120,7	1110,7	1122,4	1122,2
2,5			1120,0	1109,5	1121,8	1121,5
2,6					1121,3	1120,7
2,7					1120,7	1120,0
2,8					1120,1	1119,3

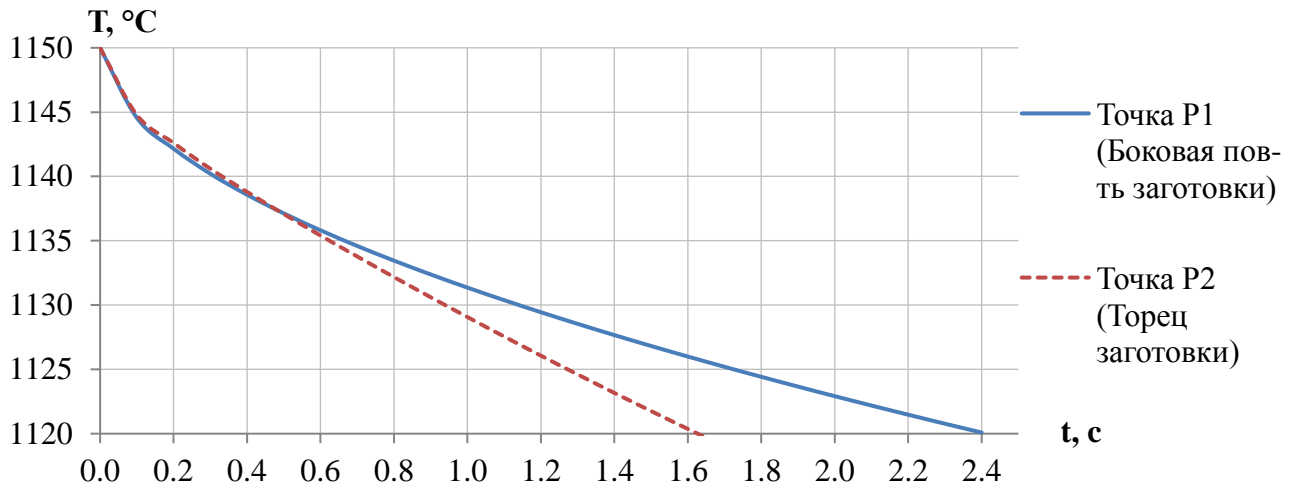


Рисунок 3.18 – График температуры поверхности заготовки  $D \times L = 31,5 \times 85$  мм в зависимости от времени охлаждения на воздухе

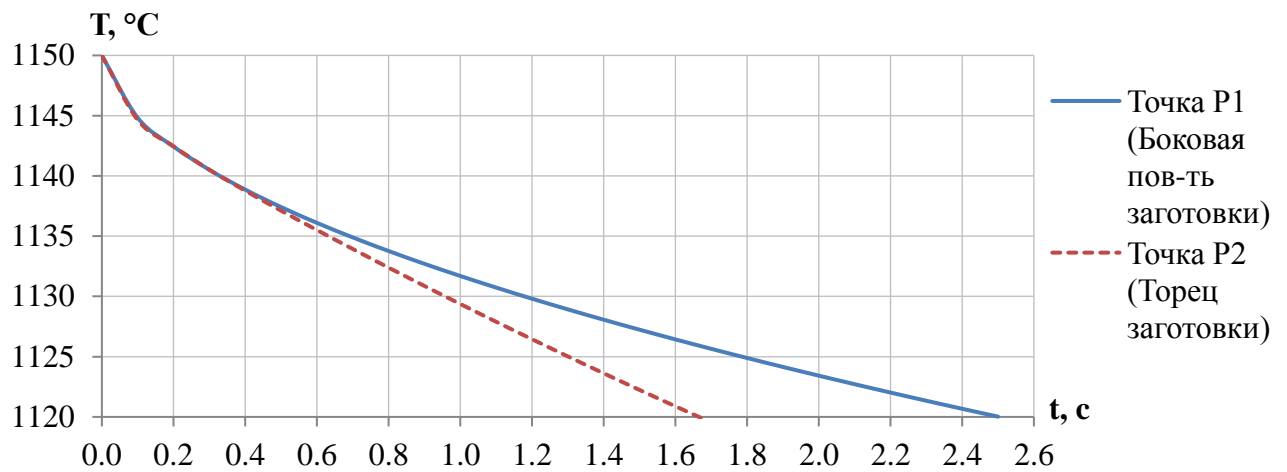


Рисунок 3.19 – График температуры поверхности заготовки  $D \times L = 36 \times 70$  мм в зависимости от времени охлаждения на воздухе

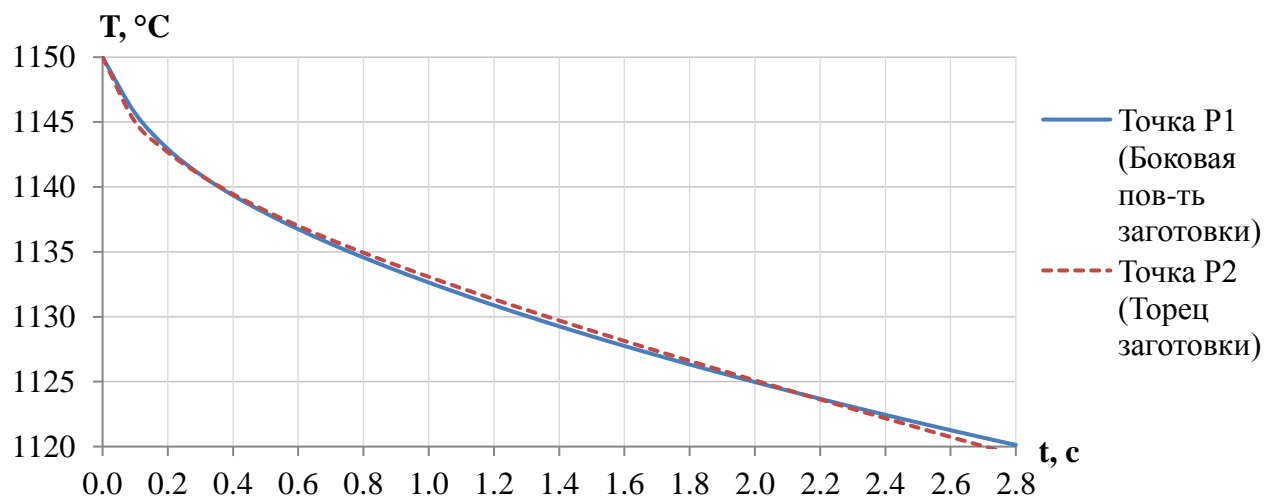


Рисунок 3.20 – График температуры поверхности заготовки  $D \times L = 60 \times 100$  мм в зависимости от времени охлаждения на воздухе

Из графиков, построенных по результатам моделирования видно, что за первую 0,1 с температура всех заготовок, независимо от размеров, резко снижается с 1150 до 1145 °С, после чего температурные кривые имеют более плавный характер. Для заготовок диаметром 31,5 и 36 мм скорости охлаждения боковой поверхности и торца практически совпадают: торец заготовки уже через 1,65 с имеет температуру 1120 °С, а поверхность заготовки остывает до данной температуры за время ~ 2,4...2,5 с. Для заготовки диаметром 60 мм температурные кривые боковой поверхности и поверхности торца совпадают на протяжении всего времени охлаждения, при этом температура 1120 °С достигается через время 2,7...2,8 с после начала охлаждения.

С целью определения допустимого времени транспортировки прошитой гильзы от прошивного стана до калибровочного пресса выполнено моделирование процесса ее охлаждения после прошивки.

Геометрические размеры полый заготовки после прошивки, использованной при проведении виртуального эксперимента, представлены на рисунке 3.21.

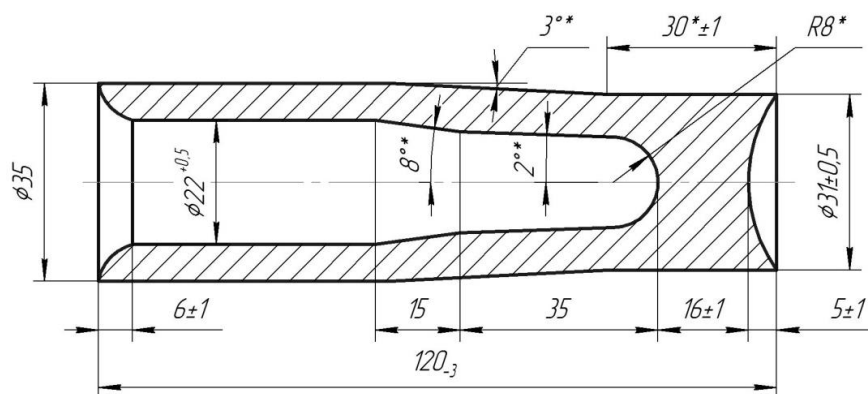


Рисунок 3.21 – Геометрические размеры полый заготовки диаметром 35 мм после прошивки

Для расчета были заданы следующие параметры:

- исходное температурное поле гильзы с дном импортировано из базы данных результатов расчета процесса прошивки. Температура полый гильзы у переднего торца (точка P1 на рисунке 3.22) приблизительно равна 1000 °С, затем по длине цилиндрической части гильзы принимает значение 1010...1020

°C (точки P2 и P3), плавно возрастаая к донной части до температуры 1060...1070 °C (точка P4). Донная часть полой гильзы имеет максимальное значение температуры – 1100 °C (точка P5). Для расчета выбрана температура наружной поверхности в зоне сформированной камеры  $T_{cp}=1000$  °C;

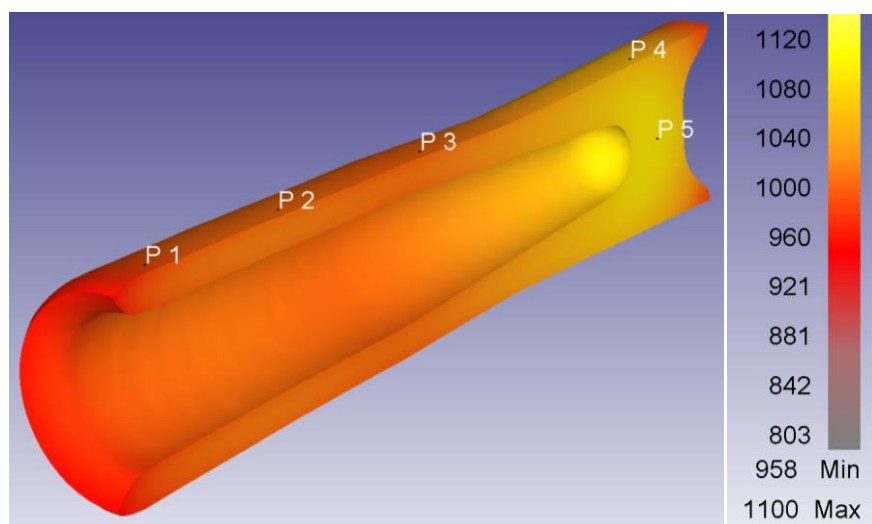


Рисунок 3.22 – Температурное поле полой гильзы с дном, полученное после моделирования процесса прошивки в DeForm 3D

- конечная температура гильзы с дном выбрана  $T_k=850$  °C, что соответствует точке выше линии  $A_3$  диаграммы состояния системы железо–углерод для стали с содержанием углерода 0,5 %. Ниже данной температуры ведение технологических операций является затруднительным и дальнейшая скорость охлаждения не представляет интереса;

- температура окружающей среды  $T_{o.c.}=20$  °C;
- коэффициент конвекции при охлаждении на воздухе без нагнетания  $\alpha=20$  Вт/м<sup>2</sup>·°C.

Результаты проведенного моделирования представлены в виде таблицы 3.6 и на рисунке 3.23.



Таблица 3.6 – Температура полой гильзы с дном после прошивки в зависимости от времени охлаждения на воздухе

Время, с	Температура полой гильзы с дном после прошивки				
	Точка P1	Точка P2	Точка P3	Точка P4	Точка P5
0,0	1000,0	1018,0	1015,6	1067,0	1100,0
0,5	993,6	1010,5	1008,1	1061,6	1094,8
1,0	986,2	1003,2	1000,6	1056,3	1088,9
1,5	978,9	996,0	993,3	1050,9	1083,1
2,0	971,7	988,9	986,1	1045,6	1077,3
2,5	964,6	981,8	979,0	1040,3	1071,6
3,0	957,7	974,9	972,0	1035,0	1065,8
3,5	950,9	968,1	965,1	1029,8	1060,2
4,0	944,2	961,4	958,4	1024,6	1054,5
4,5	937,6	954,8	951,7	1019,5	1048,9
5,0	931,1	948,3	945,2	1014,4	1043,4
5,5	924,7	941,9	938,7	1009,3	1037,9
6,0	918,4	935,6	932,3	1004,3	1032,5
6,5	912,2	929,4	926,1	999,3	1027,1
7,0	906,1	923,2	919,9	994,3	1021,8
7,5	900,1	917,2	913,9	989,4	1016,6
8,0	894,2	911,3	907,9	984,5	1011,4
8,5	888,5	905,4	902,0	979,7	1006,3
9,0	882,8	899,6	896,2	974,9	1001,2
9,5	877,3	893,9	890,5	970,1	996,3
10,0	871,8	888,3	884,9	965,4	991,4
10,5	866,5	882,9	879,4	960,7	986,6
11,0	861,3	877,5	874,0	956,0	981,8
11,5	856,2	872,2	868,8	951,4	977,1
12,0	851,2	867,1	863,6	946,9	972,5

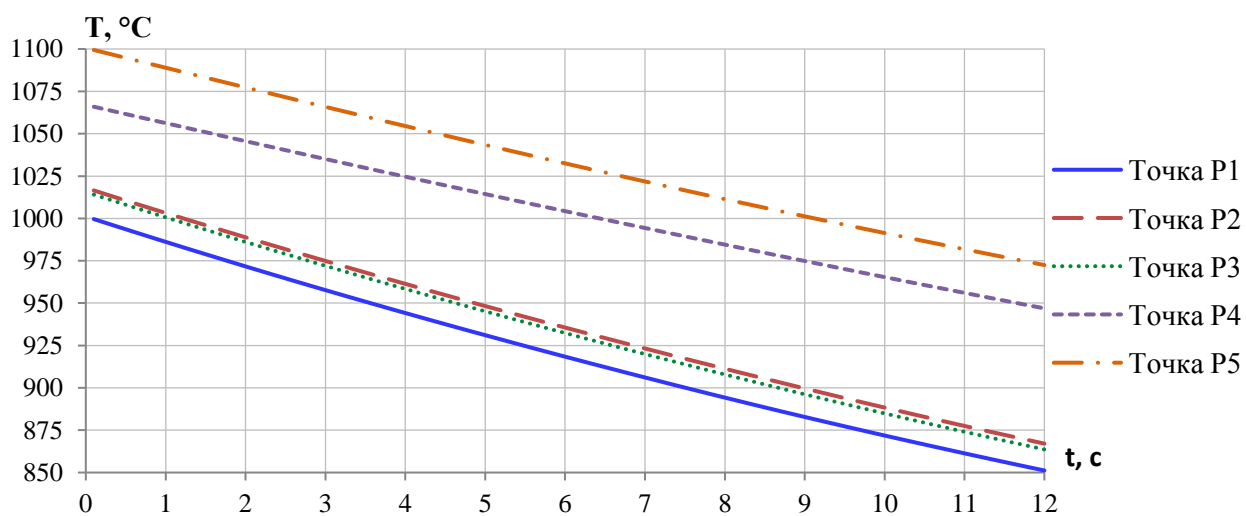


Рисунок 3.23 – Графики изменения температуры полой гильзы с дном после прошивки в зависимости от времени охлаждения на воздухе

Из графика на рисунке 3.23 видно, что прошитая гильза в области сформированной камеры (точки Р1-Р3) остывает до минимально допустимой температуры за 12 с. При этом температура донной части заготовки (точки Р4 и Р5) за это время опускается ниже 1000 °С и находится в интервале 950...970 °С.

Для представления о распределении температурного поля в объеме заготовки построены гистограммы, представленные на рисунке 3.24 а, б. На гистограммах показаны отношения количества элементов (объема) заготовки с определенным температурным полем к общему количеству элементов (объема) заготовки до охлаждения (рисунок 3.24, а) и после охлаждения на воздухе в течение 12 с (рисунок 2.24, б).

Из данных видно, что гильза имеет достаточно большой интервал разброса температур по объему с ярко выраженной зоной средней температуры. После окончания процесса прошивки свыше 40 % от объема заготовки имеет температурное поле 1010...1030 °С. После охлаждения максимальная доля объема заготовки (55 %) имеет температурное поле от 850 до 900 °С.

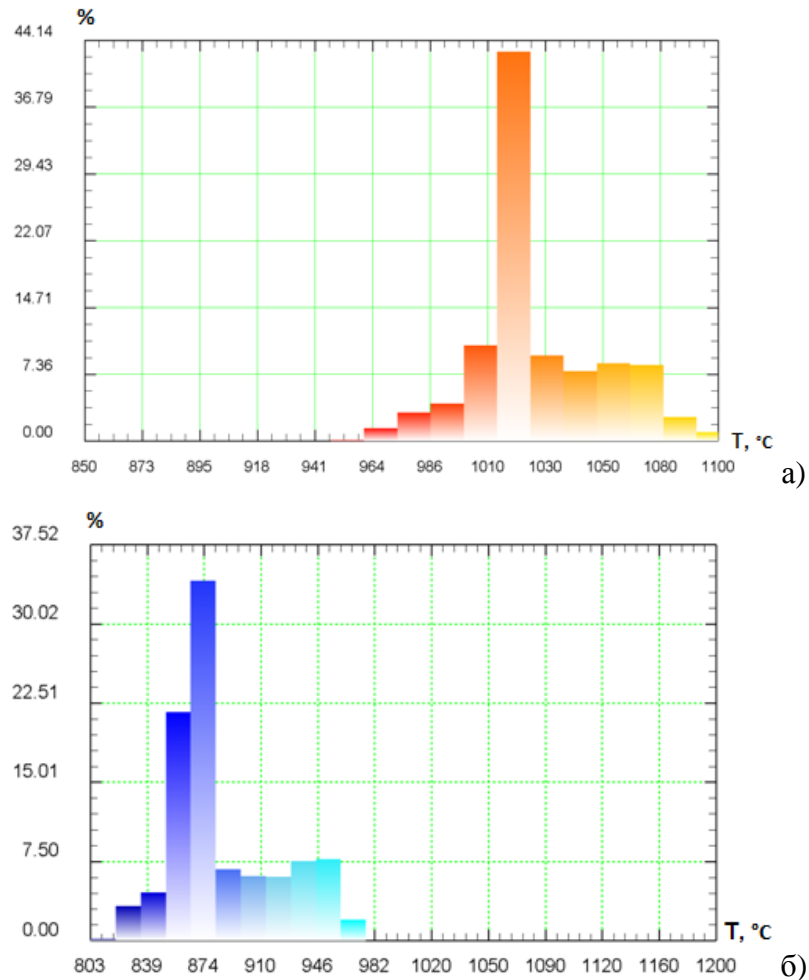


Рисунок 3.24 – Гистограммы распределения температурных зон в объеме заготовки отнесенное к общему объему заготовки после прошивки (а) и после охлаждения (б)

Таким образом, по результатам проведенного компьютерного моделирования процесса охлаждения заготовок диаметром от 31,5 до 60 мм установлено, что после выдачи из печи заготовки остывают до минимально допустимой температуры за 2,5 с. Из этого следует, что при проектировании оборудования необходимо предусмотреть передачу заготовки от нагревательной установки до валков прошивного стана за время не более 2,5 с.

После прошивки полая гильза остывает до минимально допустимой температуры обработки за 12 с, поэтому для реализации оставшейся операции калибрования в едином цикле без дополнительного подогрева длительность транспортировки гильзы от прошивного стана до пресса не должно превышать этого времени.

Полученные данные использованы как исходные для составления операционных графиков технологического процесса, выбора вспомогательного оборудования и расчетов скорости его работы.

### 3.2.6 Определение влияния условий нагрева на точность полых гильз при прошивке

В разработанной технологии для нагрева штучных заготовок перед прошивкой выбран индукционный нагрев токами промышленной частоты. Компанией ООО «ЭЛСИТ» разработано устройство подачи и нагрева, где штучные заготовки в горизонтальном положении «столбом» перемещаются по водоохлаждаемым трубчатым направляющим внутри блоков индуктора. Качество нагрева в индукционных установках является недостаточным, неравномерность нагрева заготовки по сечению достигает до 70...80 °С, а по длине до 100 °С. Поэтому для выравнивания температурного поля заготовка автоматически передается в термостат, который выполнен в виде камерной электропечи карусельного типа с вращающимся подом, изготовленным из стали 35Х18Н24С2Л. Нагревательные элементы в виде спиралей проволоки, служащие для устранения разброса температуры внутри объема заготовки размещены на внутренней стороне крышки печи.

Как показали пробные прокатки с использованием описанной выше схемы нагрева, такая компоновка оборудования является не вполне рациональной и не обеспечивает требуемого качества нагрева. Нижняя часть заготовки всегда имеет более низкую температуру из-за контакта с водоохлаждающими направляющими в индукторе. В дальнейшем эта неравномерность не устраняется в термостате, так как при передаче от индуктора до печи и в процессе нахождения внутри нее, заготовка не меняет своего положения, а нагреватели расположены со стороны более нагретой части заготовок. Данное предположение подтверждается экспериментом, проведенном на АЛВП.

Было прошито две партии заготовок по 20 штук. Первая партия нагревалась в индукторе и термостате без изменений по штатной технологии. При прошивке второй партии каждая заготовка разворачивалась вручную на  $180^\circ$  во время ее транспортировки от индуктора к термостату. Таким образом, более холодная нижняя часть заготовок после передачи в печь термостатирования находилась сверху и прогревалась нагревателями.

Полученные после проведенного эксперимента заготовки представлены на рисунке 3.25. Установлено, что все гильзы, прошитые без поворота заготовок, имеют кривизну переднего и заднего торцев 4...8 мм и повышенную разностенность. Из партии гильз, прошитых с поворотом заготовок, 90 % имеют кривизну торцев до 2 мм и разностенность до 0,5 мм.



Рисунок 3.25 – Полые гильзы, прошитые без кантовки (а) и с поворотом перед задачей в термостат (б)

Существующее устройство нагрева заготовок и необходимый для выполнения технологии режим его работы не позволяет вносить значительные изменения в конструкцию, поэтому было разработано устройство для поворота заготовок на  $180^\circ$  во время ее транспортировки на подъемном лифте от индуктора к термостату (рисунок 3.26).

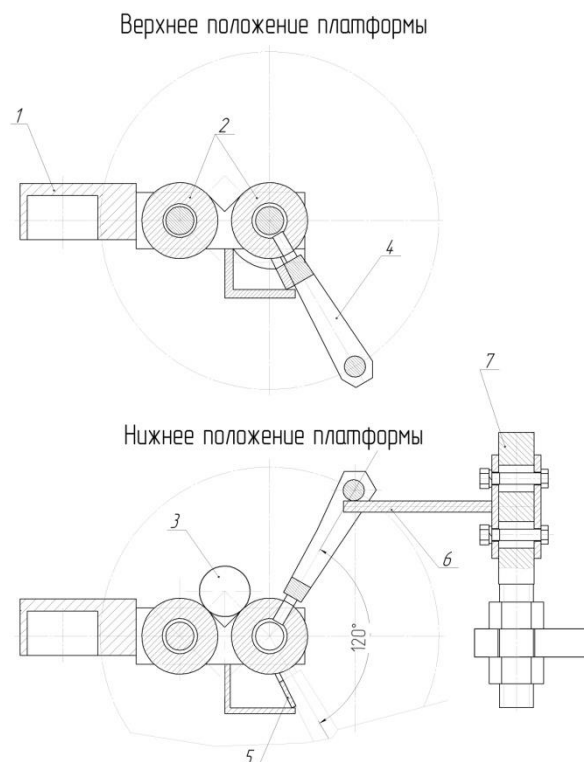


Рисунок 3.26 – Устройство для поворота заготовок

На подъемной платформе 1 на подшипниках скольжения смонтированы два свободно вращающихся ролика 2, на которые выдается нагретая в индукторе заготовка 3. На боковой поверхности одного из роликов прикреплен рычаг 4, который при движении платформы вверх опускается под собственным весом и вращает связанный с ним ролик, благодаря чему вращается заготовка, лежащая на роликах. Рычаг останавливается опорой 5, приваренной к нижней части платформы. Угол поворота рычага рассчитан так, чтобы заготовка диаметром 32 мм повернулась вокруг своей оси на  $180^\circ$  и имеет возможность регулирования при прокатке заготовок другого диаметра.

После того, как платформа поднялась в крайнее верхнее положение и заготовка толкателем переместилась в рабочее пространство термостата, включается обратный ход и платформа начинает движение вниз для приема следующей заготовки из индуктора. Во время движения вниз, рычаг встречается с планкой 6, жестко зафиксированной на штативе 7, благодаря чему поднимается в исходное верхнее положение. Планка 6 имеет возможность регулирования для точного позиционирования и изменения угла поворота рычага.

Чтобы избежать проскальзывания заготовки относительно роликов во время ее поворота, на рабочей поверхности роликов нанесена накатка глубиной 0,5 мм.

Разработанное устройство позволит снизить неравномерность температуры, что является одним из основных факторов, определяющих точность получаемых гильз при прошивке. В частности, как показали экспериментальные прокатки, улучшается геометрия гильзы по кривизне торцев и разностенности.

### 3.3 Техническая характеристика и состав оборудования АЛВП

Назначение: Автоматизированная линия винтовой прокатки предназначена для изготовления полых заготовок с дном методом горячей винтовой прошивки с последующим калиброванием на механическом прессе.

Краткая техническая характеристика автоматизированной линии винтовой прокатки представлена в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Краткая техническая характеристика АЛВП

Исходная заготовка	горячекатаный прутки из стали марок 50, 60, 30ХГСА и др.
Размеры исходных заготовок, мм: диаметр длина масса, кг	32; 42; 60 65 - 95; 85 - 100; 110 - 130 0,39 - 0,6; 0,47 - 0,63; 0,83 - 2,5
Размеры полых заготовок, мм: диаметр наружный диаметр внутренний длина толщина дна	31,5; 41,5; 59 21,6; 27; 36 120 - 140; 100 - 140; 210 - 250 8 - 12; 8 - 14; 18 - 22
Производительность, шт./ч	до 200
Цикл прокатки, с	20...30
Смазка оборудования: жидкая густая	заливная в картеры редукторов от индивидуальной станции густой смазки и закладная
Смазка технологическая сухая	$\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{BaCl}_2 + \text{NaCl}$
Охлаждающая жидкость технологического инструмента: рабочих валков прошивной оправки пуансона	вода
Давление воздуха в пневмосистеме, МПа	0,63
Напряжение электрического тока, В	380, 220
Режим работы	автоматический и ручной в процессе наладки

В состав оборудования опытно-промышленной линии АЛВП [ссылка на патент] входят следующие основные машины и устройства (рисунок 3.27): нагревательное устройство 1, трехвалковый стан винтовой прокатки 2, калибровочный пресс 3 с электромеханическим приводом, камера контролируемого охлаждения 4.

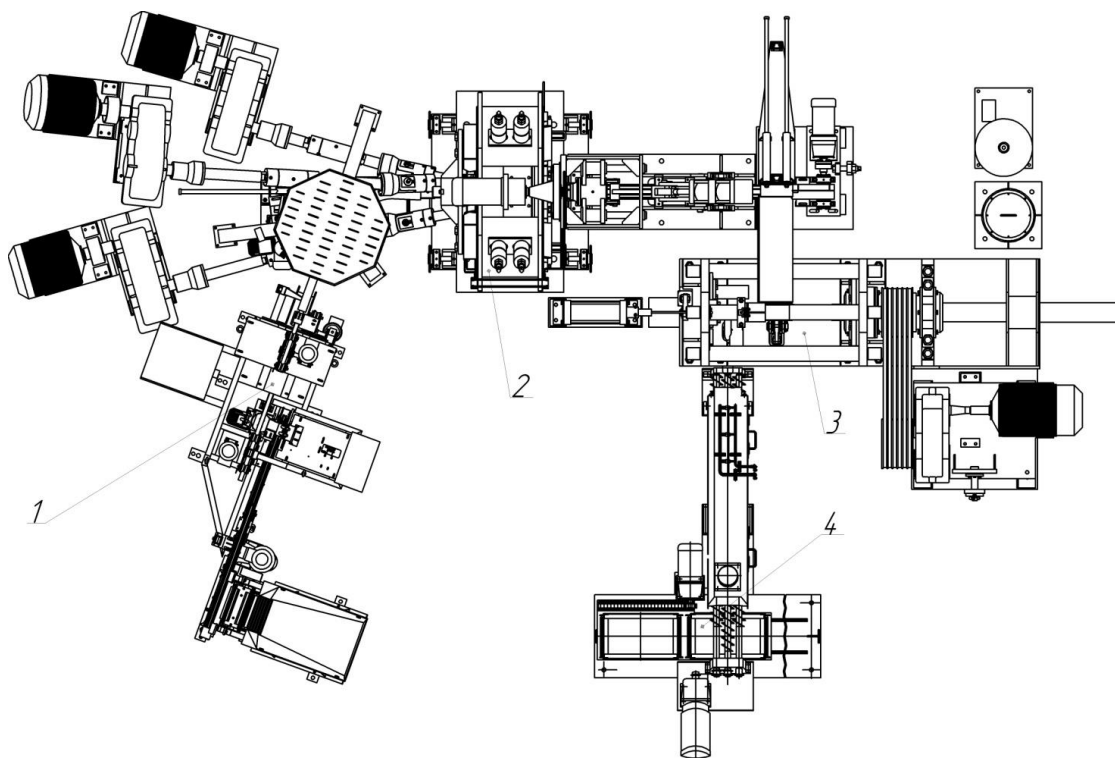


Рисунок 3.27 – Состав оборудования линии АЛВП: 1 – нагревательное устройство; 2 – трехвалковый стан винтовой прокатки; 3 – калибровочный пресс; 4 – камера контролируемого охлаждения

#### *Нагревательное устройство штучных заготовок.*

Нагревательное устройство штучных заготовок предназначено для нагрева зацентрированных штучных заготовок перед прокаткой.

Техническая характеристика нагревательного устройства представлена в таблице 3.8.

Нагревательное устройство (рисунок 3.28) состоит из силового блока преобразователя, механической системы подачи заготовок к соответствующим механизмам и в индуктор, аппаратной системы управления, линейки бетонированных индукторов и карусельной печи электросопротивления.



Таблица 3.8 – Техническая характеристика нагревательного устройства

Исходные заготовки: диаметр, мм длина, мм масса, кг материал	30 (32); 40 (42); 60 65 - 95; 85 - 100; 110 - 130 0,39 - 0,6; 0,47 - 0,63; 0,83 - 2,5 стали марок 50, 60, 30ХГСА и др.
Температура нагрева, °С	1160 - 1180
Цикл прокатки, сек	17...30
Неравномерность температурного поля заготовки, °С по поперечному сечению по длине	5 10
Производительность, шт./ч	до 200
Частота преобразователя, кГц	от 7 до 20
Максимальная установленная мощность, кВА	80
Охлаждение индуктора - водяное, проточной технической водой: - со скоростью потока, в зависимости от типоразмера изделия не менее, л/мин - температурой не выше, °С	от 12 до 30 30
Режим работы	автоматический и полуавтоматический в процессе наладки

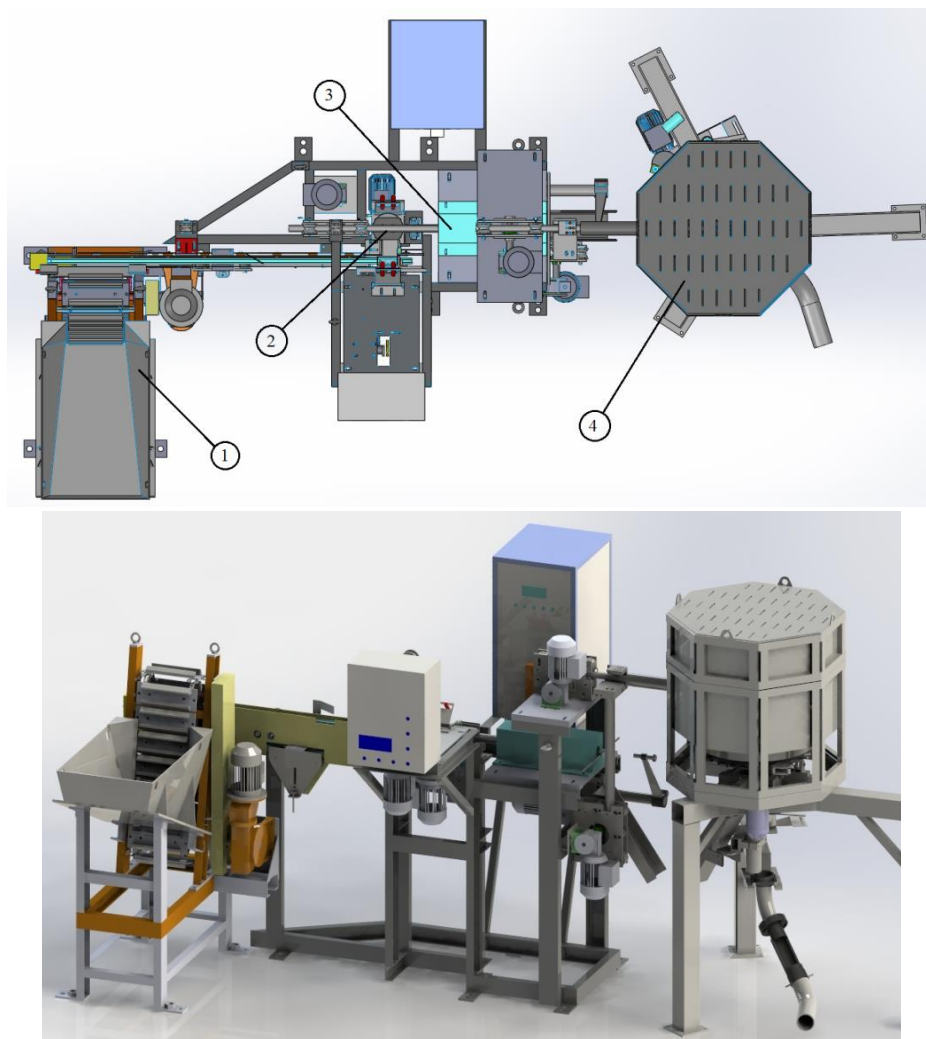


Рисунок 3.28 – Нагревательное устройство штучных заготовок: 1 – загрузочный бункер;  
2 – блок ориентации заготовок; 3 – индукционный нагреватель; 4 – печь  
электросопротивления карусельного типа (термостат)

Принцип действия установки основан на индуцировании в металле вихревых электрических токов (токов Фуко) под действием высокочастотного переменного электромагнитного поля, в результате чего становится возможным нагрев металла до любой температуры.

Индуктор представляет собой катушку индуктивности, выполненную из медной трубки и залитую в жаропрочный бетон. Индуктор может быть различным по геометрической форме и размерам, которые определяются нагреваемой деталью.

Установка индукционного нагрева состоит из следующих конструктивно-разделенных узлов:

- силового блока преобразователя (СБП);
- бетонированного индуктора.

Система механической подачи заготовок (СМПЗ) состоит из следующих изделий:

- автоматического выключателя для подключения к питающей сети;
- аппаратной системы управления;
- загрузочного бункера с цепной выборкой заготовок;
- цепного накопительного конвейера;
- механизма подачи заготовок к блоку ориентации;
- блока ориентации заготовок;
- механизма подачи заготовок в индуктор;
- линейки бетонированных индукторов;
- механизма выгрузки заготовок из индуктора;
- механизма отбраковки;
- механизма подачи заготовок в термостат;
- механизма подачи заготовок к стану;
- механизма аварийной выгрузки заготовок из карусельной электропечи сопротивления.

Все приводы механизмов состоят из электродвигателя, редуктора и механической системы приведения в движение соответствующего механизма.

Работа нагревательного устройства производится в следующей последовательности. Наклонный цепной конвейер выбирает заготовки из загрузочного бункера и подаёт их на цепной накопительный конвейер. Заготовки, перемещаясь по цепи попадают в зону контроля зацентровочного отверстия. После прохождения зоны контроля зацентровочного отверстия заготовки поштучно подаются механической системой передачи в блок ориентации, который состоит из поворотного стола с электромеханическим приводом. При необходимости ориентации заготовки зацентрованным торцом вперед по направлению движения, происходит поворот стола на  $180^\circ$ , после чего заготовка с помощью толкателя подаётся в индуктор. В индукторе заготовки нагреваются «столбом», перемещаясь по охлаждаемым медным направляющим при помощи толкателя. После прохождения индуктора заготовка либо отбраковывается (если температура заготовки не попадает в заданное поле допуска) и сбрасывается из индуктора в карман для сброса заготовок, либо, поднимаясь с помощью вертикального лотка-лифта, подаётся на ось входной трубы термостата и при помощи механизма подачи заготовок задается в печь термостатирования (рисунок 3.29).

Под печи имеет 10 позиций, после подачи первой заготовки в рабочее пространство печи, происходит поворот пода на определенный угол при помощи механизма вращения и на ось подачи заготовок в термостат устанавливается следующая позиция для приема заготовок. Когда все 10 позиций пода печи заполнены, следующая заготовка задается толкателем в печь и одновременно сталкивает первую заготовку в центр пода, где выполнено отверстие для выдачи заготовок. Выдержанная в течение определенного времени заготовка по трубе попадает в приемный желоб выходной стороны стана.

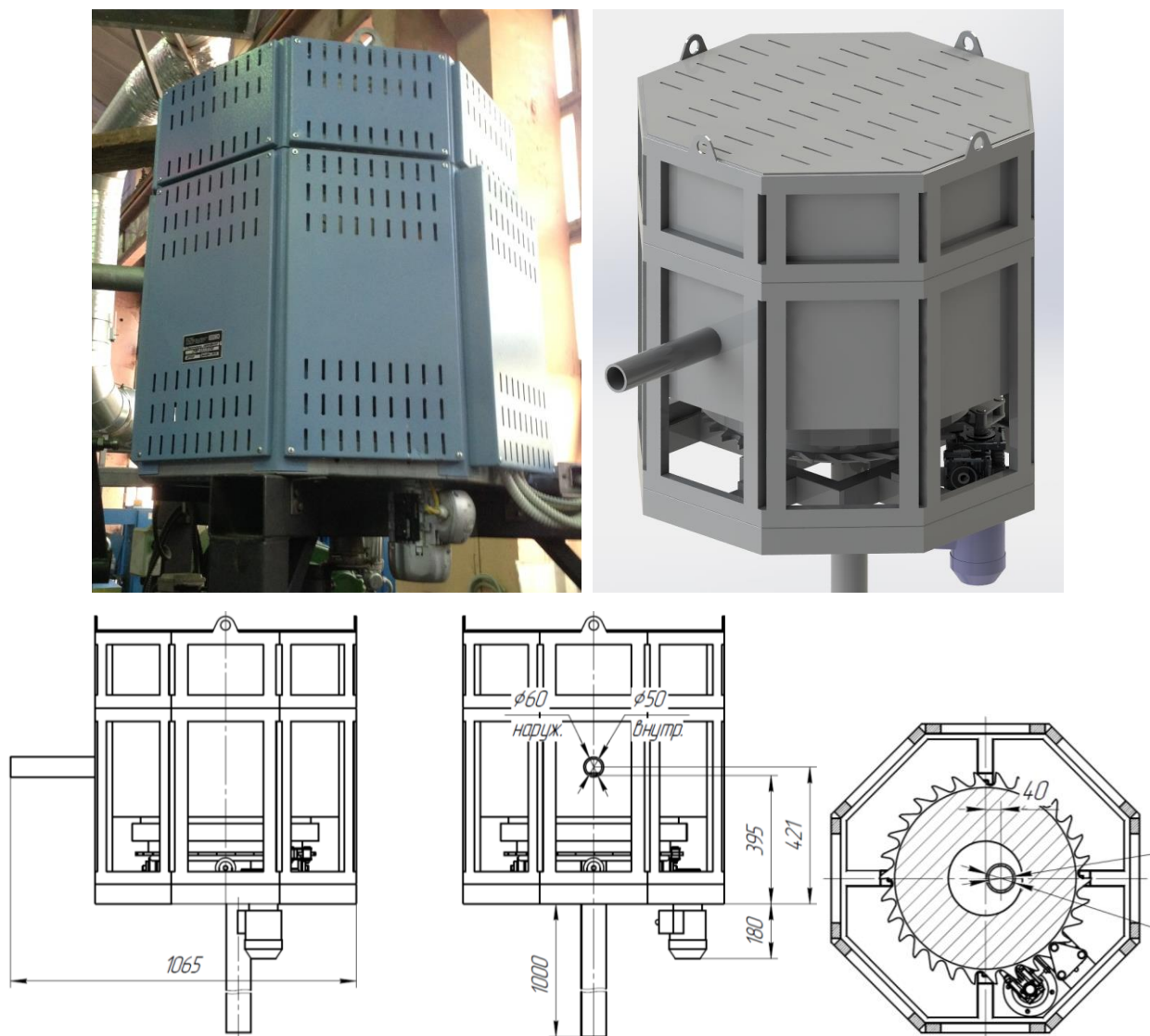


Рисунок 3.29 – Электродпечь сопротивления карусельного типа (термостат)

На выходе из термостата установлен механизм отбраковки (рисунок 3.30), предназначенный для сброса заготовок из термостата в случае аварийной остановки АЛВП.

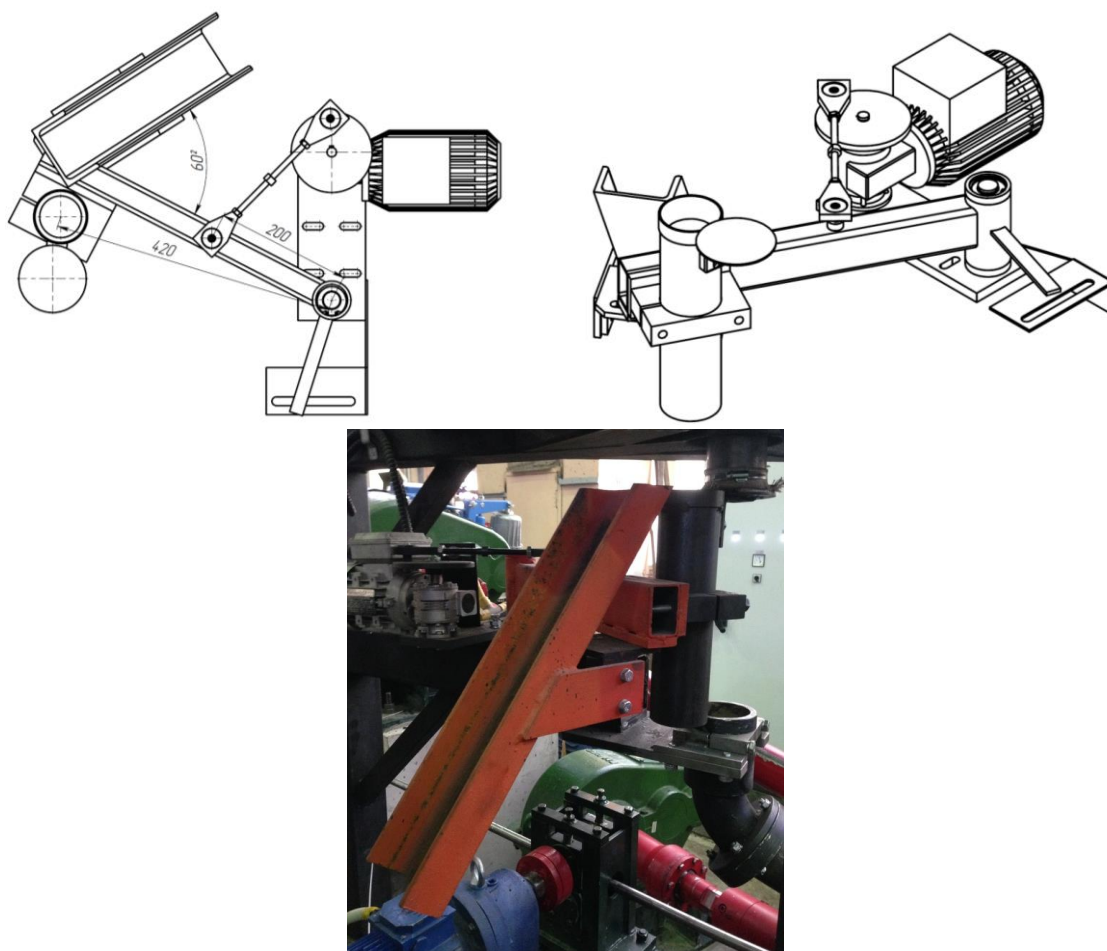


Рисунок 3.30 – Механизм отбраковки и аварийного сброса заготовок из термостата

Механизм отбраковки имеет три рабочих положения:

- подача заготовок к прошивному стану;
- выгрузка заготовок из печи в карман для сброса заготовок;
- крышка выходной трубы печи закрыта.

Смена положений происходит от электродвигателя через кривошипно-шатунный механизм. Точное положение механизма определяется бесконтактными датчиками.

Всем технологическим процессом до подачи в стан управляет аппаратная система управления автоматизированной установкой.

*Трехвалковый прошивной стан «30-80».*

Трехвалковый прошивной стан «30-80» предназначен для горячей прошивки заготовок в гильзу с дном.

Краткая техническая характеристика трехвалкового прошивного стана представлена в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Краткая техническая характеристика трехвалкового прошивного стана «30-80»

Размеры исходной заготовки: диаметр, мм длина, мм масса, кг	30 (32); 40 (42); 60 65 - 95; 85 - 100; 180 - 215 0,39 - 0,6; 0,47 - 0,63; 0,83 - 2,5
Температура нагрева заготовки, °C	1160 - 1180
Размеры гильзы с дном, мм: диаметр наружный диаметр внутренний длина толщина дна	33; 43; 60 22; 26; 34 122; 110; 180 8-10; 10-12; 18-25
Цикл прокатки, с	20...30
Охлаждающая жидкость технологического инструмента: рабочих валков прошивной оправки	вода
Производительность, шт./ч	до 200
Режим работы	автоматический и полуавтоматический в процессе наладки

Прошивной стан (рисунок 3.31) включает в себя: рабочую клеть 1, главный привод рабочих валков 2-4, приемно-задающий стол 5, выходную сторону 6.

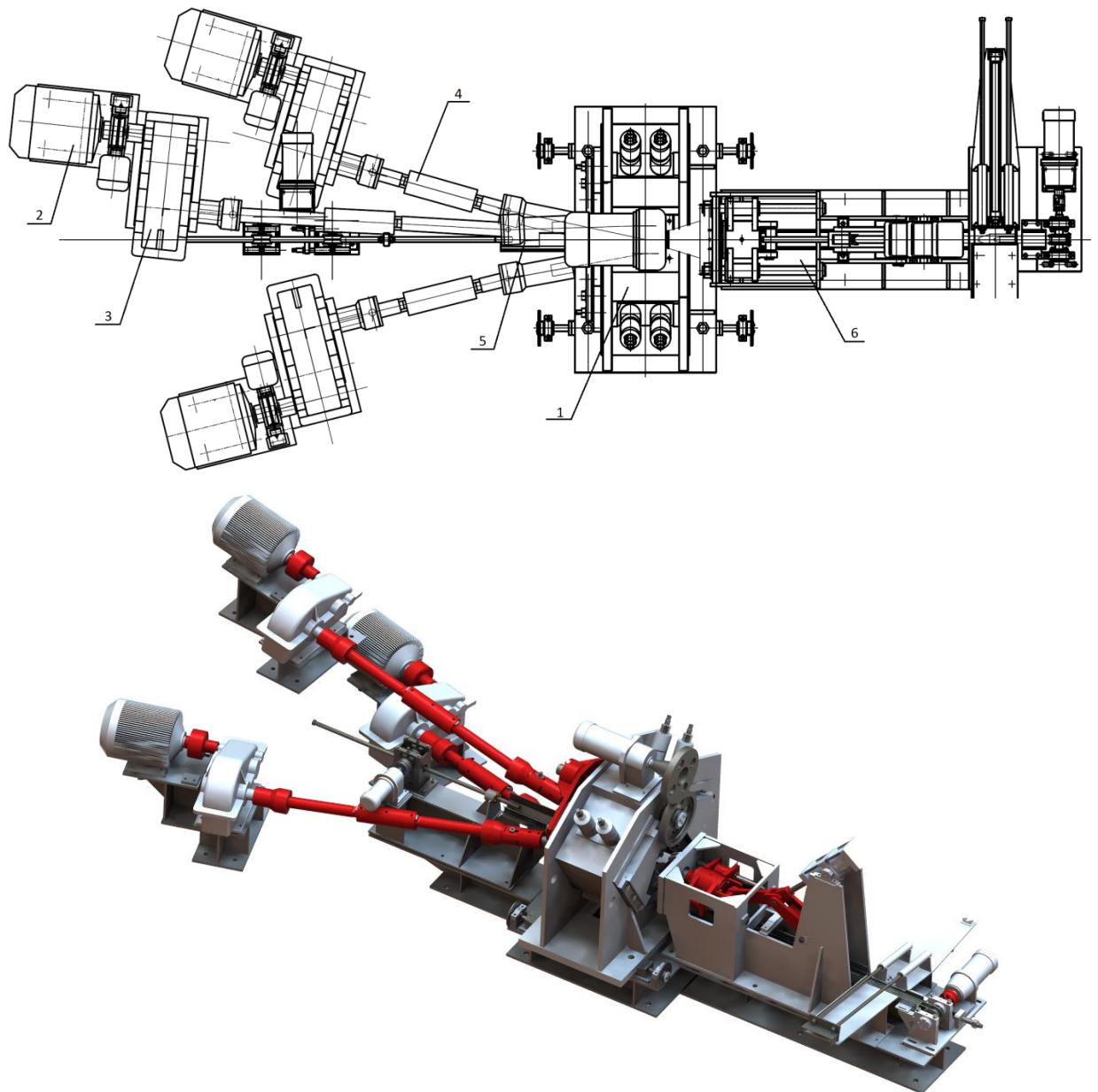


Рисунок 3.31 – Трехвалковый прошивной стан «30-80»: 1 – рабочая клеть;  
2 – электродвигатель; 3 – редуктор; 4 – шпиндель; 5 – приемно-задающий стол;  
6 – выходная сторона

Рабочая клеть (рисунок 3.32) состоит из станины закрытого типа *1* в расточках которой под углом  $120^\circ$  установлены три кассеты с рабочими валками 2. Валки развернуты на угол подачи  $12^\circ$  и имеют угол раскатки  $5^\circ$ .



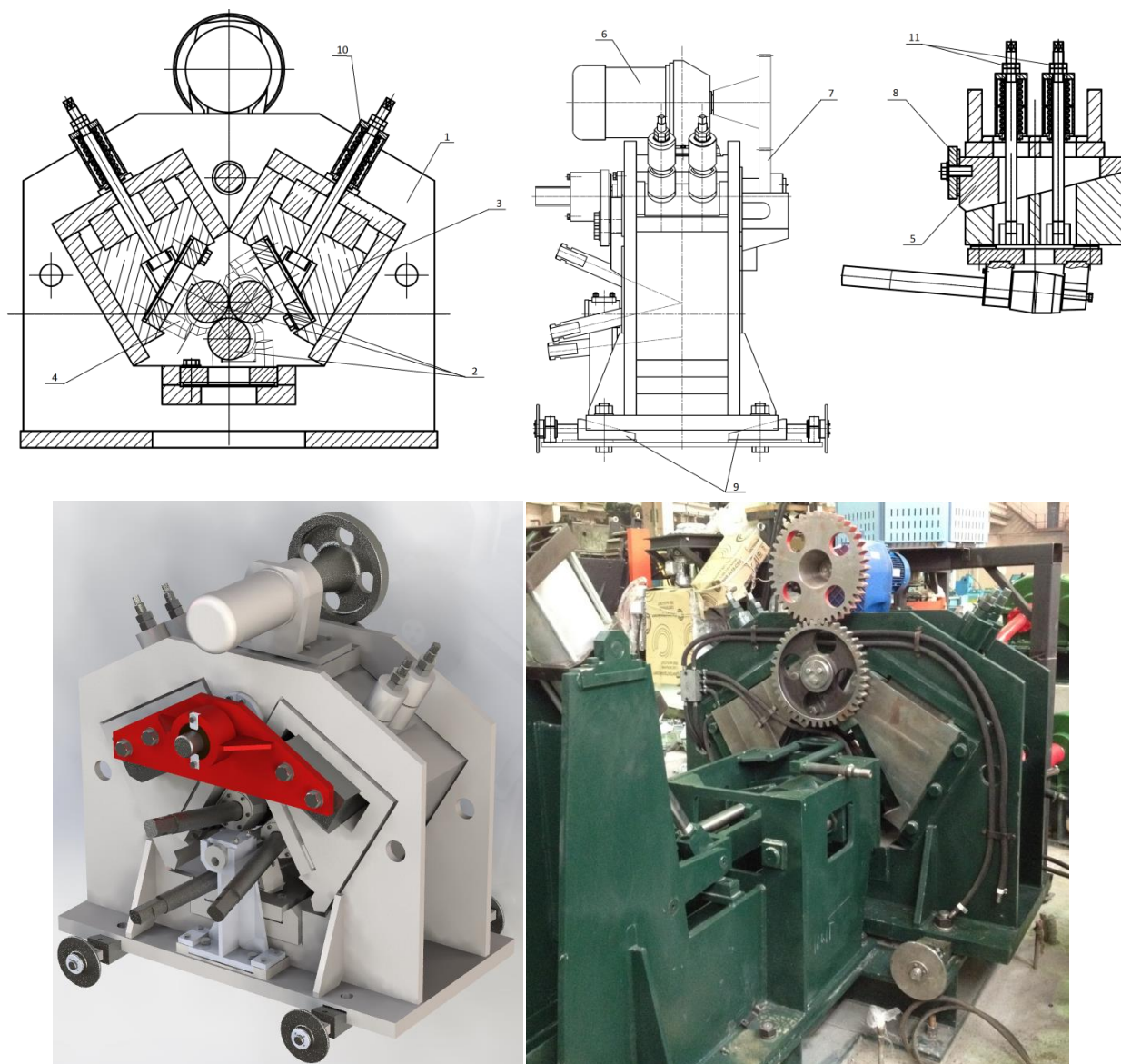


Рисунок 3.32 – Рабочая клеть трехвалкового стана винтовой прокатки: 1 – станина; 2 – рабочие валки; 3 – кассета; 4 – подушка валка; 5 – клин; 6 – мотор-редуктор; 7 – зубчатое зацепление; 8 – траверза; 9 – клинья; 10 – тяга; 11 – затяжные гайки

Кассета с рабочим валком состоит из непосредственно кассеты 3 с расточками, в которых установлен рабочий валок с подушками 4. Подушки рабочего валка фиксируются в расточках кассеты с помощью выступов. Валок смонтирован в подушках на подшипниках скольжения, смазка которых осуществляется через отверстия в подушках от индивидуальной смазочной станции. Нижний валок является стационарным.

Клиновой нажимной механизм 5-8 предназначен для одновременного перемещения кассет с валками при изменении величины раствора калибра [68,



69], восприятия усилия прокатки и передачи его на станину. Нажимной механизм включает в себя два клина 5 с общим приводом, состоящим из мотор-редуктора 6, зубчатого зацепления 7, пары винт-гайка и траверзы 8, которая соединена с клиньями при помощи болтов.

Установка клетки на ось прокатки при переходе на другой диаметр заготовки осуществляется при помощи четырех клиньев 9, установленных между основанием станины и рамой (рисунок 3.32). Перемещение клиньев осуществляется вручную путем вращения винта внутри стационарно закрепленной гайки. После установки клетки осуществляется затяжка болтов, которые крепят рабочую клетку к стационарной раме.

Уравновешивающее устройство, представленное на рисунке 3. служит для выбора зазоров между нажимными клиньями и кассетой и закреплено на станине. Прижим кассеты с валком к клину обеспечивается с помощью двух подпружиненных тяг 10. Пружины предварительно заневоливаются гайками 11 на усилие, превышающее вес кассеты с рабочим валком и шпинделем, благодаря чему выбираются зазоры между клиньями и кассетой.

Главный привод стана предназначен для вращения рабочих валков с заданными параметрами: частотой вращения и крутящим моментом.

В состав оборудования главного привода стана входят: электродвигатель 1, редуктор 2, шпиндель 3 (рисунок 3.33).

Привод валков – индивидуальный, осуществляется от трех электродвигателей мощностью 30 кВт каждый. Вращение и крутящий момент от двигателей к рабочим валкам передается через цилиндрические редукторы и шпиндели шарикового типа.

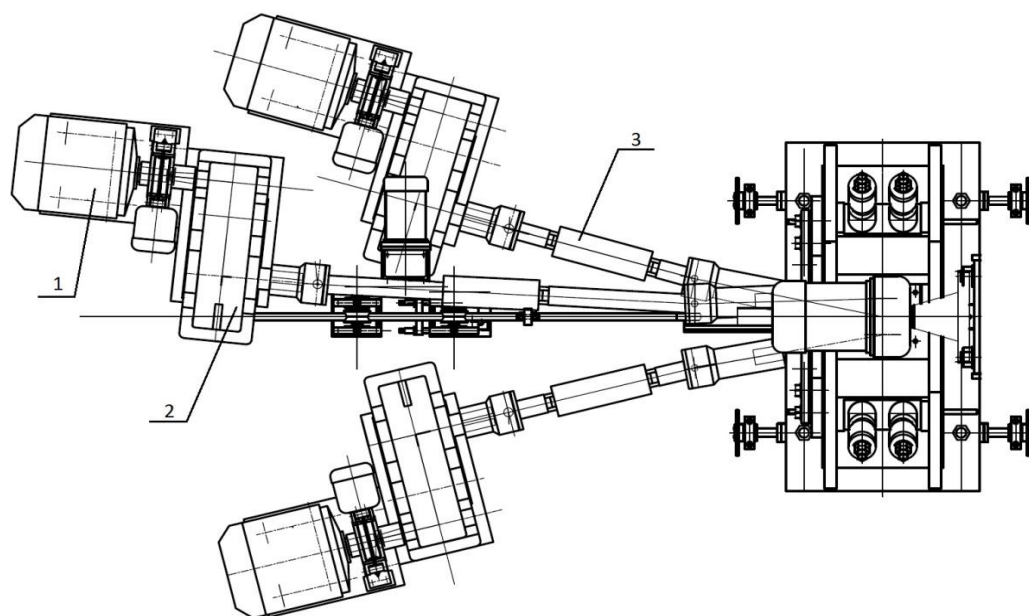


Рисунок 3.33 – Главный привод клетки прошивного стана: 1 – электродвигатель; 2 – редуктор;  
3 – шпиндель

Для быстрой аварийной остановки главного привода прошивного стана на раме между двигателем и редуктором установлен гидравлический тормоз ТКГ-200.

Приемно-задающий стол (рисунок 3.34) состоит из рамы 5, на которой смонтированы желоб с вводной проводкой 1 и вталкиватель заготовок 2, приводимый в движение приводными роликами 3 и установленный в опоре с втулкой 4. Привод вталкивателя осуществляется от мотор-редуктора мощностью 1 кВт.

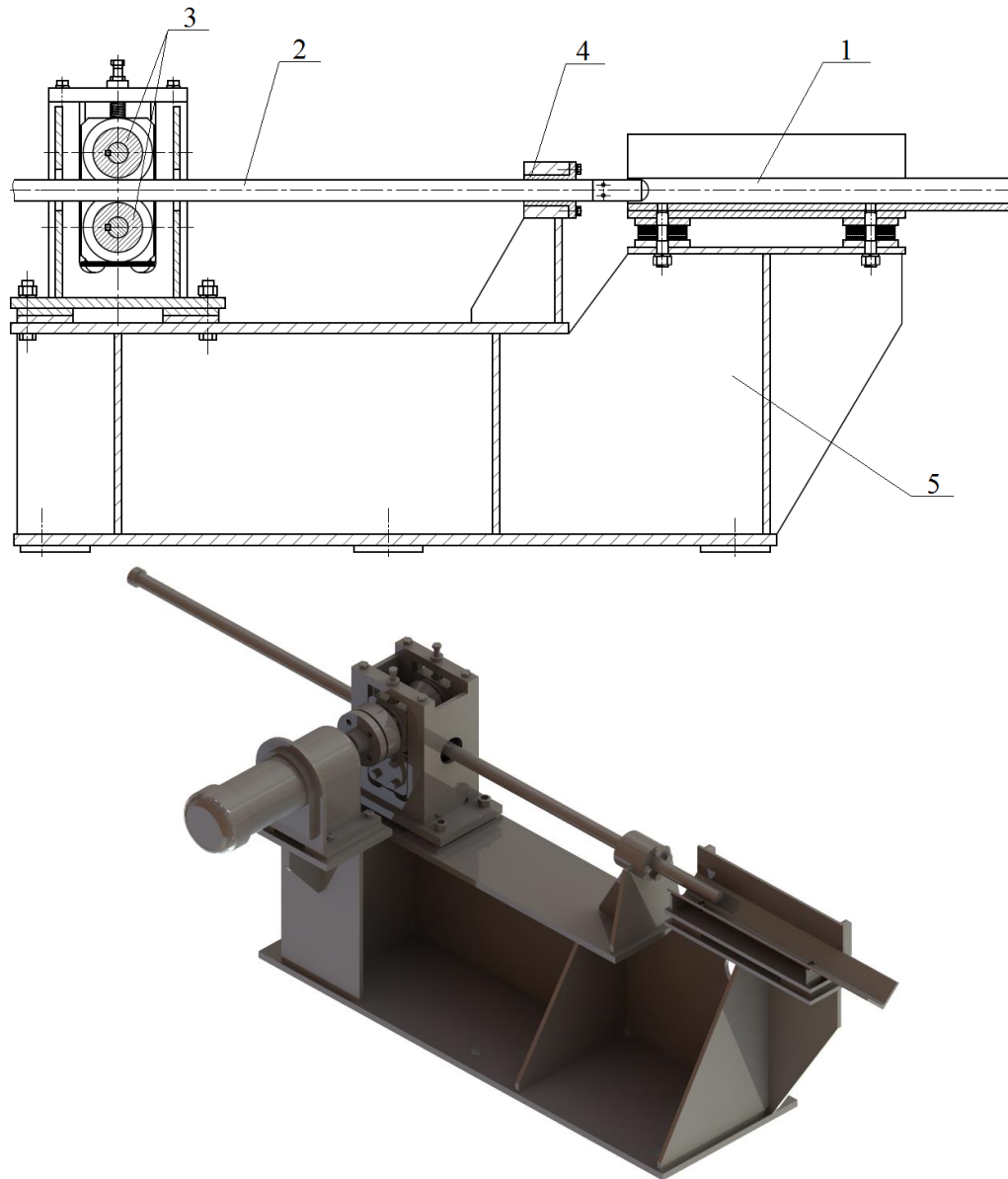


Рисунок 3.34 – Приемно-задающий стол: 1 – приемный желоб; 2 – вталкиватель заготовок; 3 – задающие ролики; 4 – опора с втулкой; 5 – рама.

Выходная сторона прошивного стана (рисунок 3.35) состоит из рамы 11, на опорной поверхности которой установлены рычажный механизм 5, наклонный желоб 1, цепной транспортер 10 смонтированный во внутренней части станины, демпфирующее устройство 12 и съемник заготовок с оправочного стержня.

Цепной транспортер приводится в движение вращающимися звездочками от мотор-редуктора, который установлен на отдельной раме и имеет возможность перемещения вдоль цепи для ее натяжения.

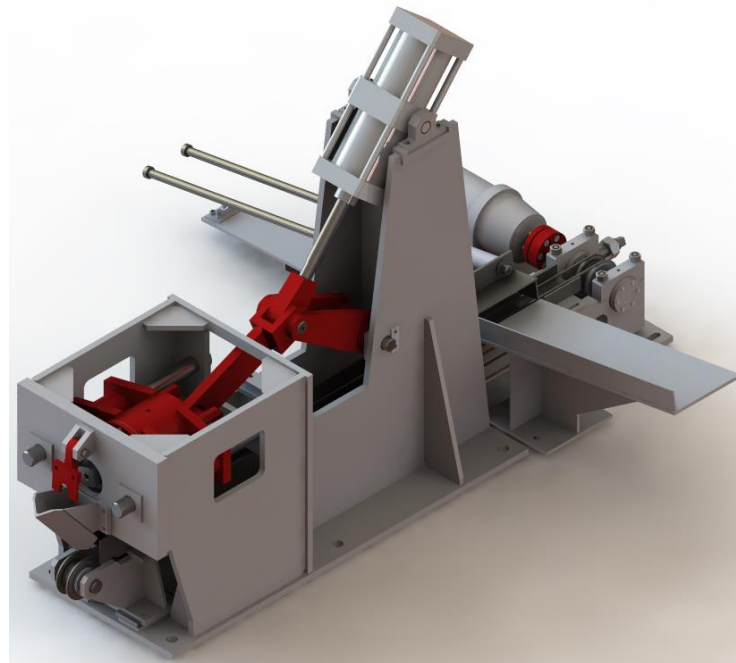
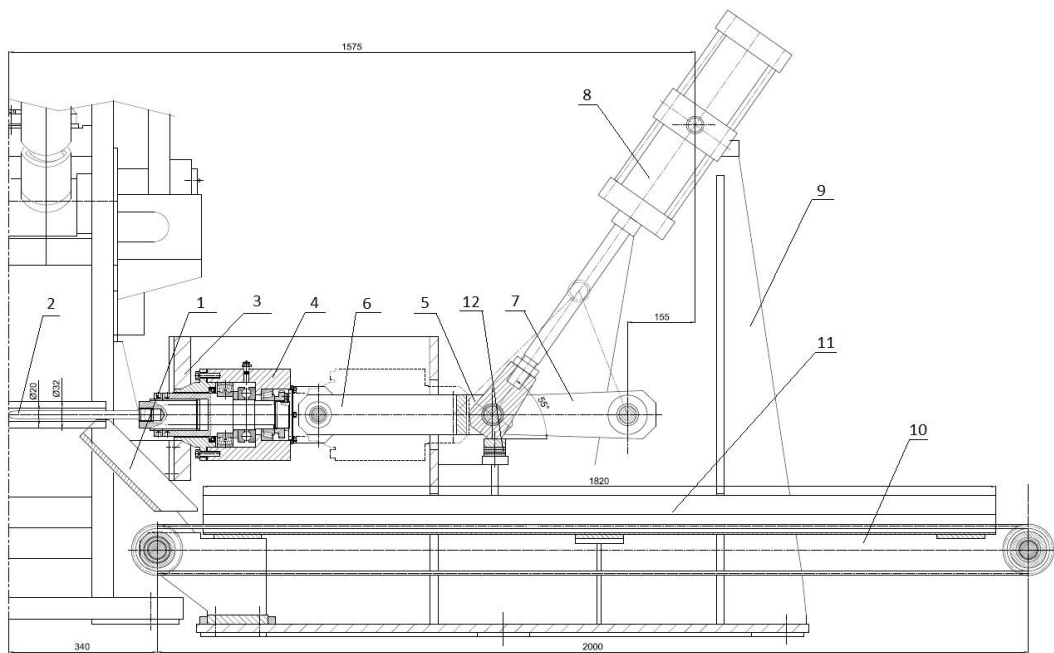


Рисунок 3.35 – Выходная сторона прошивного стана: 1 – наклонный желоб; 2 – стержень с оправкой; 3 – упорная плита; 4 – упорная головка; 5 – рычажный механизм; 6, 7 – рычаги; 8 – пневмопривод; 9 – рама для пневмопривода; 10 – транспортер; 11 – рама; 12 – демпфирующее устройство

Рычажный механизм 5 предназначен для установки, фиксации и быстрого отвода из очага деформации оправки со стержнем с целью получения гильзы с дном.

Складывание рычагов осуществляется при помощи пневмоцилиндра 8, установленного на раме 9 по сигналу фотодатчика, фиксирующего наличие горячего металла на выходе из рабочих валков.

Для восприятия усилий прокатки при прошивке стержень с оправкой 2 закреплен в упорной головке 4, которая благодаря шпинделю, смонтированному в подшипниковой опоре, обеспечивает возможность свободного вращения стержня. Упорная головка при установке стержня с оправкой в очаге деформации упирается в плиту 3, обеспечивающую точное позиционирование упорной головки 4 и фиксацию ее по конической поверхности с помощью рычагов 6 и 7.

Для восприятия осевого усилия и предотвращения произвольного складывания рычагов необходимо, чтобы рычаги 6 и 7 в рабочем положении были опущены несколько ниже линии, соединяющей оси шарниров.

В качестве демпфирующего устройства 12 выбран набор металлических прокладок, которые гасят ударные нагрузки при опускании рычагов 6 и 7.

В конце цепного транспортера установлен упор с трубкой для подачи сухой технологической смазки внутрь гильзы с дном с помощью сжатого воздуха.

Передача заготовки от выходной стороны в приемный желоб калибровочного пресса осуществляется толкателем от пневмоцилиндра.

#### *Пресс калибровочный.*

Пресс калибровочный с электромеханическим приводом предназначен для формоизменения донной части полой гильзы после прошивного стана путем подпрессовки в матрице и калибрования наружной цилиндрической поверхности в горячем состоянии способом протяжки через кольцо.

Краткая техническая характеристика калибровочного пресса представлена в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Краткая техническая характеристика калибровочного пресса

Размеры полых заготовок, мм:	
диаметр	33, 43, 60
длина	120 - 220
толщина дна	5-8; 8,5-10; 18-22
Температура калибрования, °C	до 1150
Усилие калибрования, кН	до 500
Длина рабочего хода, мм	250
Скорость перемещения винта, мм/с	до 80
Цикл калибрования, с	14
Производительность, шт./ч	180
Мощность главного привода, кВт	45
Охлаждающая жидкость технологического инструмента	вода
Технологическая смазка	водный раствор 50 %-ной сульфидно-спиртовой барды + 8 % - 10 % графита или водный раствор триполифосфата натрия
Режим работы	автоматический и полуавтоматический в процессе наладки

Пресс калибровочный с электромеханическим приводом (рисунок 3.37) включает в себя раму 1, на которой смонтированы две опорные стойки 2, соединенные тремя колоннами 3, на которых расположены втулки 4; предварительная затяжка колонн и стоек обеспечивается гайками 5.

Пресс также имеет привод штока пуансона 6, выталкиватель заготовок из матрицы 7, устройство для съема заготовок с пуансона после калибрования 8 и приспособления для подачи смазки во внутреннюю полость изделия и в матрицу.

На общей плите 9 смонтированы контейнер с матрицей 10 и контейнер с волоочильным кольцом 11, которые устанавливаются на ось пресса путем поворота плиты. Поворот осуществляется при помощи пневмоцилиндра 12, который через рычаг 13 вращает вал с плитой.

Съем заготовок с пуансона осуществляется при помощи съемника 14 (рисунок 3.36), который опускается в прорезь контейнера после операции калибрования наружной поверхности полый заготовки. Приводом съемника служит пневмоцилиндр 15.

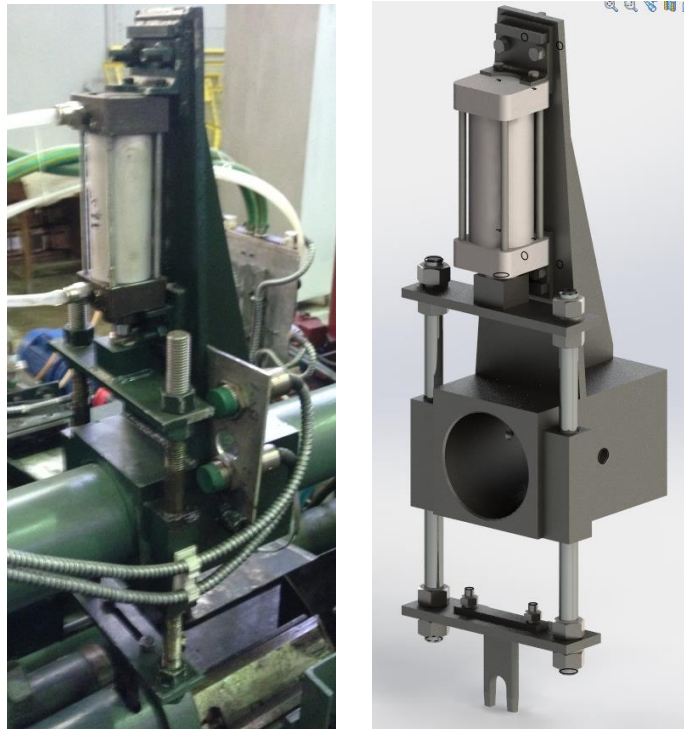


Рисунок 3.36 – Съемник заготовок с пуансона

Для выгрузки полых заготовок из пресса в контейнере предусмотрена прорезь, через которую они попадают в отводящий желоб *16*.

Выталкиватель заготовок из матрицы включает пневмоцилиндр *17*, к штоку которого присоединен стержень *18*, устанавливаемый в дно матрицы. Цилиндр *17* смонтирован на раме *19*.

Перемещение пуансона осуществляется от электромеханического привода *6* через пару винт-гайка. Гайка *20*, закрепленная в подшипниковых опорах, вращается с помощью клиноременной передачи и сообщает движение винту *21*, на конце которого закреплен пуансон *22*. Остановка винта *21* с пуансоном в крайнем переднем и заднем положении осуществляется по сигналу от бесконтактных датчиков.

Укладка заготовок разного диаметра на ось пресса осуществляется путем вертикального перемещения приемного желоба *23* от пневмоцилиндра *24*, смонтированного на раме *25*.

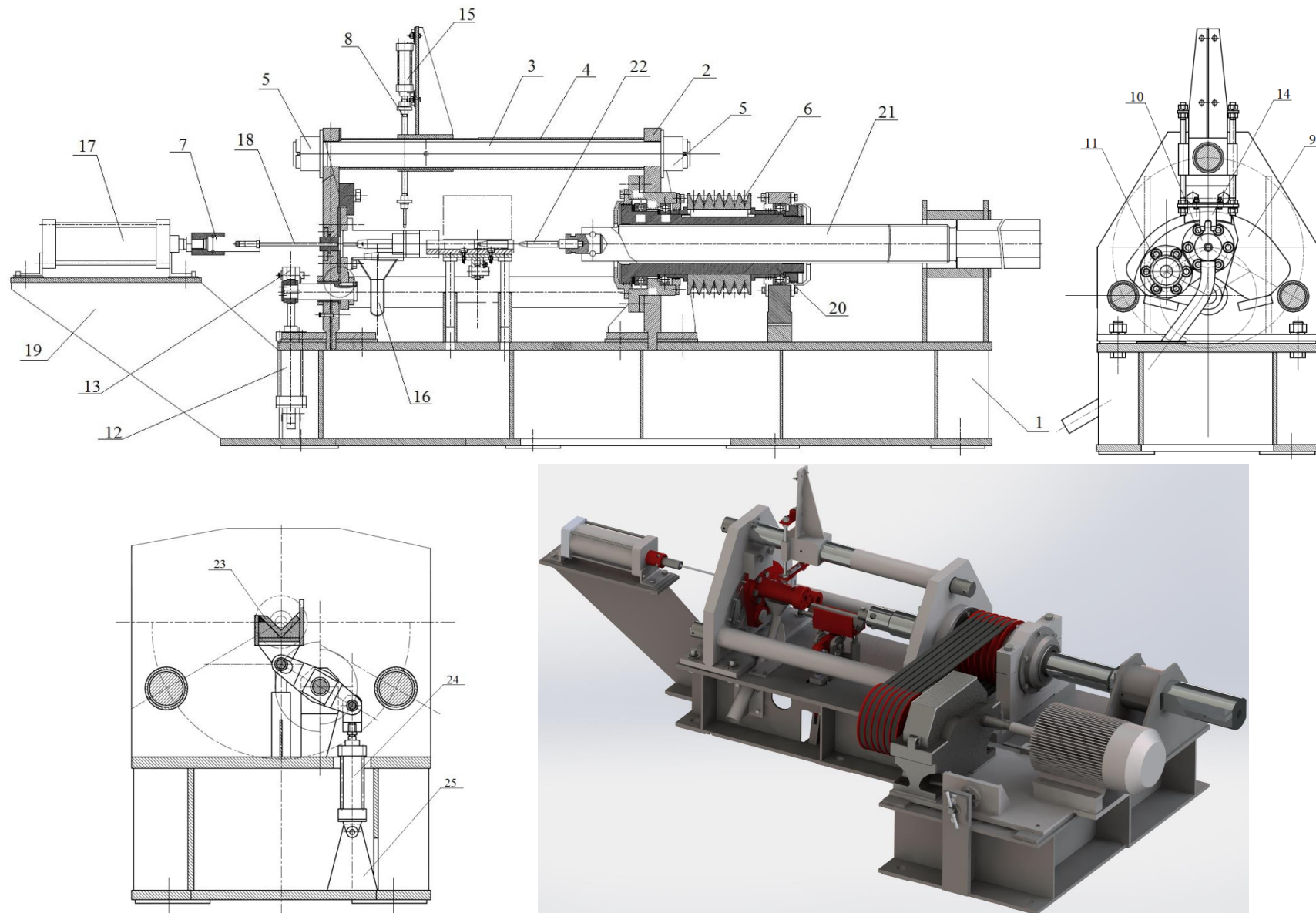


Рисунок 3.37 – Пресс калибровочный с электромеханическим приводом



Главный привод калибровочного пресса предназначен для перемещения пуансона и создания необходимого усилия прессования.

В состав оборудования главного привода пресса (рисунок 3.38) входят: электродвигатель 1 мощностью 45 кВт, цилиндрический редуктор 2, клиноременная передача 3, состоящая из двух шкивов (ведущего и ведомого) и клиновых ремней, гайки 4 и винта 5.

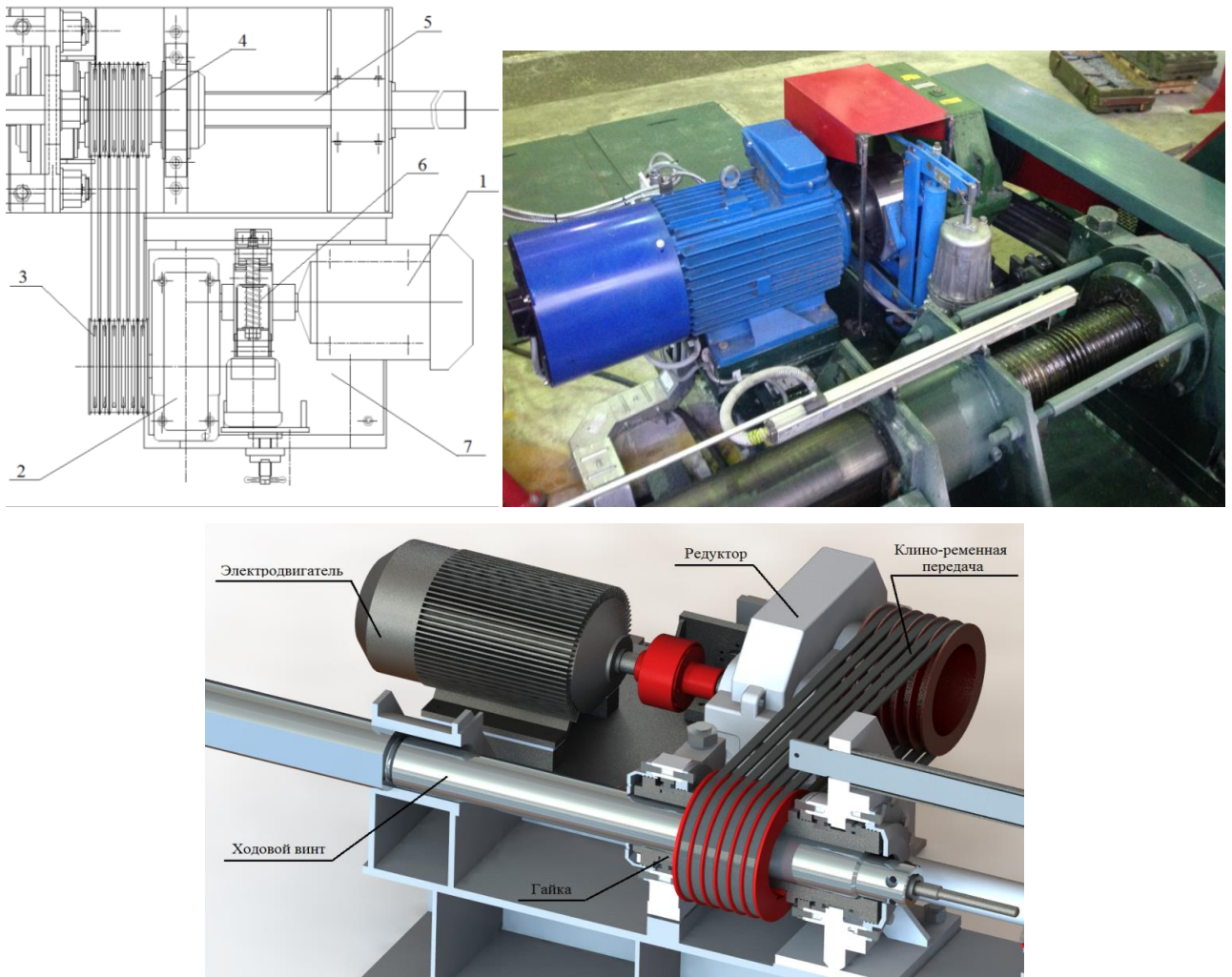


Рисунок 3.38 – Главный привод калибровочного пресса

Для быстрой остановки винта на муфте, соединяющей валы двигателя и редуктора, предусмотрен электрогидравлический тормоз ТКГ-300 Б.

Электродвигатель 1, редуктор 2 и тормоз 6 установлены на раме 7.

*Камера контролируемого охлаждения заготовок.*

Назначение: камера охлаждения заготовок предназначена для контролируемого охлаждения полых заготовок с дном до заданной температуры и складирования в тару после горячей обработки давлением на АЛВП.

Краткая техническая характеристика камеры контролируемого охлаждения заготовок представлена в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Краткая техническая характеристика камеры контролируемого охлаждения заготовок

Размеры полых заготовок, мм:	
диаметр	32; 42
длина	90...120; 100...140
масса, кг	0,4...0,8
Температура подачи заготовок на входе в камеру охлаждения, °С	800...850
Температура полых заготовок на выходе из камеры охлаждения, °С	200...250
Цикл подачи заготовок в камеру, с	20...30
Скорость вращения шнекового транспортера, об/мин	5...50
Способ охлаждения	водо-воздушной смесью
Давление воды в системе, МПа	0,2
Расход воды, л/ч	до 100
Напряжение электрического тока, В	380
Тип главного привода камеры охлаждения	электромеханический
Мощность главного привода, кВт	2,2
Мощность привода перемещения каретки, кВт	1,1
Режим работы	автоматический и ручной в процессе наладки

Камера контролируемого охлаждения заготовок (рисунок 3.39) включает в себя: раму шнекового транспортера 1, корпус каретки 2, кожух 3, короб 4, устройство водовоздушного охлаждения 5, шнеки 6 и 7, главный привод шнекового транспортера 8, привод перемещения каретки 9, распределитель 10.

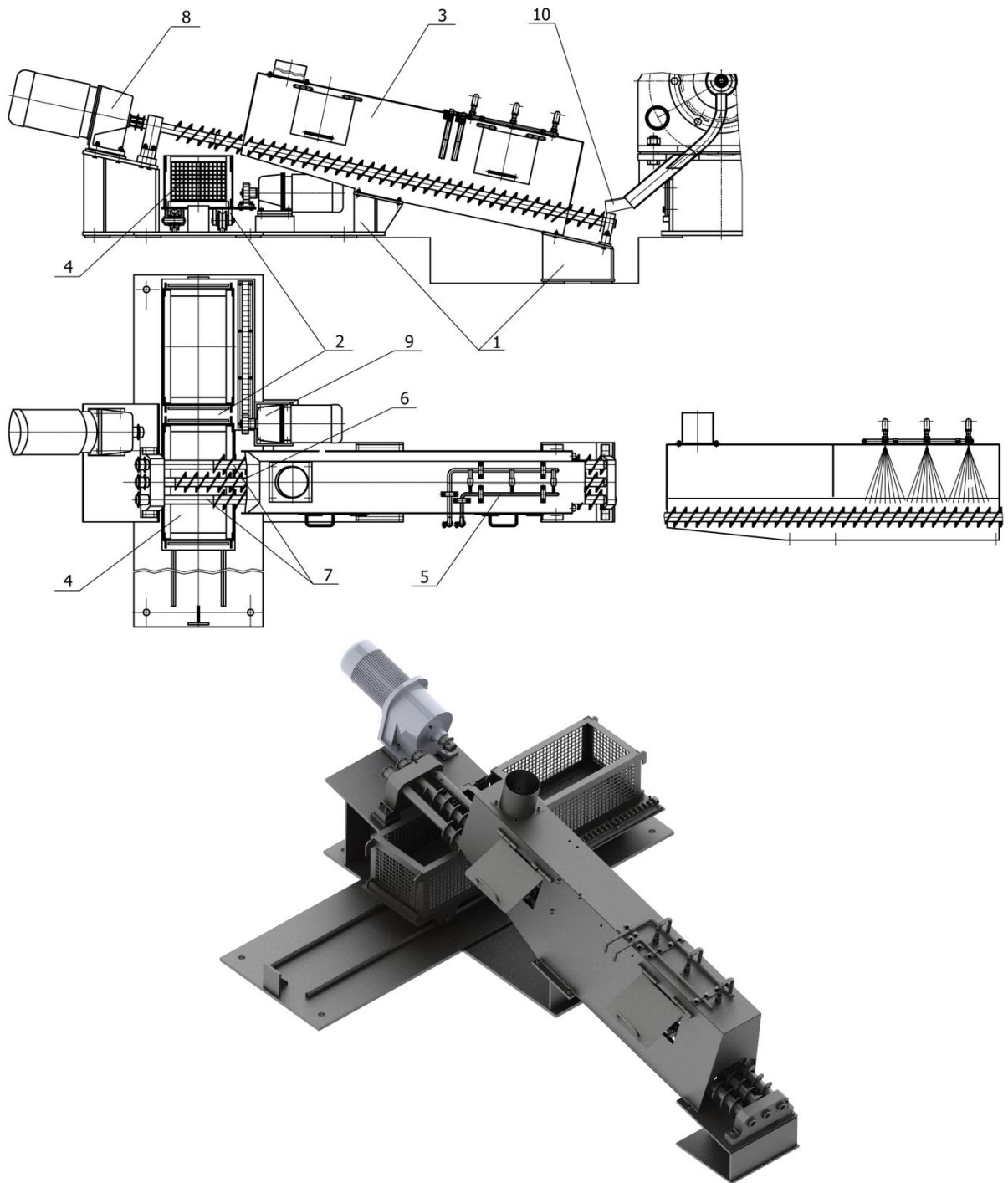


Рисунок 3.39 – Камера контролируемого охлаждения заготовок: 1 – рама шнекового транспортера; 2 – корпус каретки; 3 – кожух; 4 – короб; 5 – устройство водовоздушного охлаждения; 6, 7 – шнеки; 8 – главный привод шнекового транспортера; 9 – привод перемещения каретки; 10 – распределитель

Рама шнекового транспортера *1* предназначена для установки и позиционирования всех основных узлов оборудования.

Корпус каретки *2* установлен на реечных направляющих рамы шнекового транспортера и предназначен для установки тележки с коробами.

Кожух 3 закреплен болтами к раме шнекового транспортера и предназначен для защиты и отвода выделяющегося тепла от охлаждающихся заготовок через отводное отверстие в верхней части кожуха. В боковой стенке кожуха предусмотрены два люка с крышками, предназначенные для удобства эксплуатации и наблюдения.

Короб 4 представляет собой сварную коробчатую конструкцию с сетчатыми стенками и предназначен для накопления охлажденных заготовок после прохождения их через камеру охлаждения. В составе оборудования камеры охлаждения заготовок предусмотрено два короба, которые установлены на корпусе каретки.

Устройство водовоздушного охлаждения 5 установлено на верхней крышке кожуха 3 и предназначено для распыления охлаждающей водовоздушной смеси внутри камеры охлаждения заготовок. По двум отдельным трубам к трем форсункам, выходные отверстия которых установлены внутри камеры охлаждения, подводится вода и воздух, давление которых регулируется кранами, установленными отдельно на подачу воды и воздуха.

Шнеки 6 и 7 предназначены для перемещения заготовок по камере охлаждения и состоят из трубы, на которую навита спиралевидная стальная полоса. Шнеки установлены в опорах на радиально-упорных подшипниках качения. Вращение шнеков осуществляется от главного привода шнекового транспортера. С выходной стороны камеры охлаждения крайние шнеки 7 имеют меньшую длину спиральной образующей, благодаря чему охлажденные заготовки сваливаются с шнекового транспортера в короб 4, установленный под ним.

Главный привод шнекового транспортера 9 (рисунок 3.40) предназначен для вращения шнекового транспортера с заданной частотой вращения и состоит из мотор-редуктора 1 мощностью 2,2 кВт, ведущей звездочки 2, цепи 3 и ведомых звездочек 4, установленных на концах шнеков.

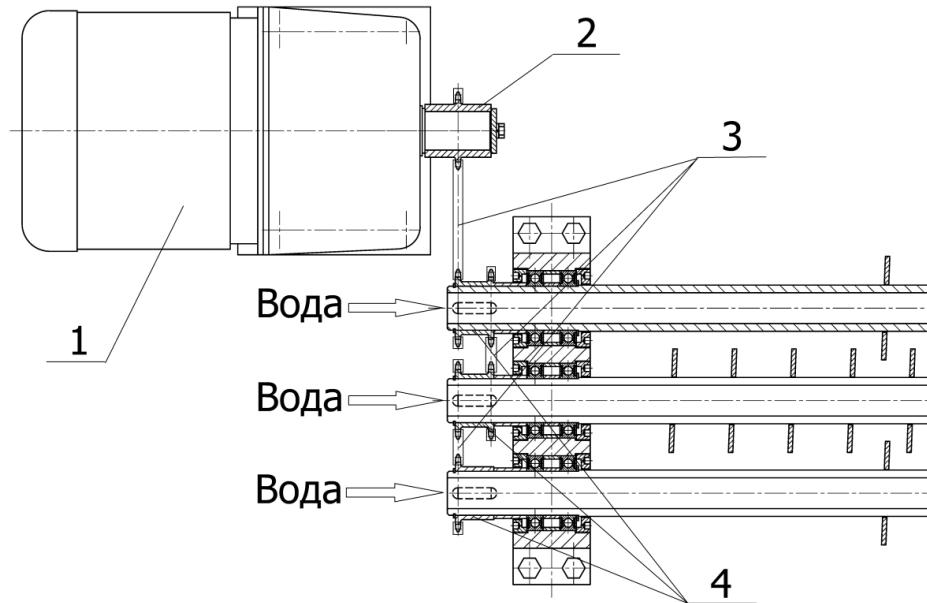


Рисунок 3.40 – Главный привод шнекового транспортера: 1 – мотор-редуктор; 2 – звездочка ведущая; 3 – цепь; 4 – звездочки ведомые

Привод перемещения каретки (рисунок 3.41) предназначен для перемещения корпуса каретки с накопительными коробами и состоит из мотор-редуктора 1 мощностью 1,1 кВт и реечной передачи, включающей шестерню 2 и рейку 3.

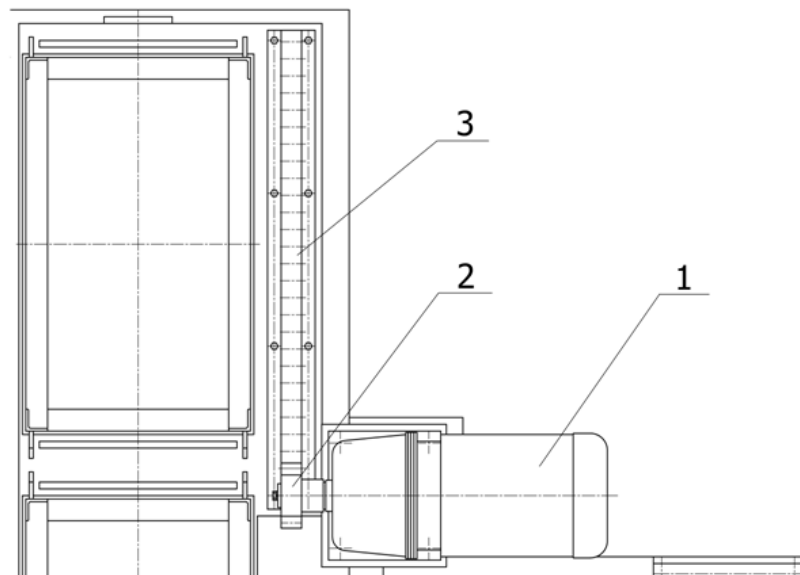


Рисунок 3.41 – Привод перемещения каретки: 1 – мотор-редуктор; 2 – шестерня; 3 – рейка

Распределитель 10 (рисунок 3.42) предназначен для передачи заготовок из наклонного желоба пресса на шнековый транспортер и распределения заготовок по «ручьям» транспортера.

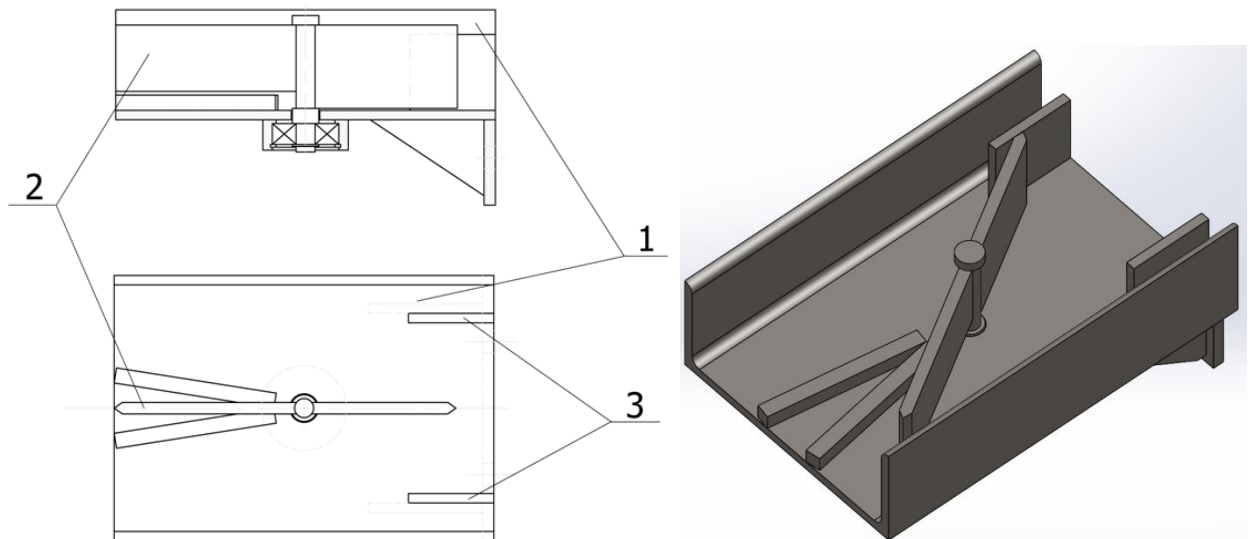


Рисунок 3.42 – Распределитель: 1 – желоб; 2 – шторка; 3 – ребро

Распределитель состоит из желоба *1* и шторки *2*, которая поворачиваясь на определенный угол, поочередно распределяет поступающие после прессы заготовки на разные «ручьи» шнекового транспортера камеры охлаждения. Угол поворота шторки *2* ограничивается ребрами *3*, приваренными внутри желоба *1*.

### 3.4 Работа оборудования АЛВП

Исходный горячекатаный пруток разрезается на штучные заготовки ленточной или дисковой пилой в холодном состоянии, каждая штучная заготовка зацентрируется сверлом с одного торца, который в последующих операциях является передним. Штучные заготовки подаются в бункер нагревательного устройства, включающего высокочастотный индуктор и термостат электрического сопротивления. Из загрузочного бункера заготовки по цепному накопительному транспортеру перемещаются к блоку ориентации заготовок, поштучно толкателем сталкиваются на поворотный стол, который при необходимости поворачивается, ориентируя заготовку зацентровочным отверстием по ходу прошивки. После этого механизмом подачи заготовок в индуктор заготовки поштучно подаются во внутреннее рабочее пространство индуктора. Нагрев в индукторе толкательного типа осуществляется «столбом», из индуктора предварительно нагретые заготовки передаются в термостат для

выравнивания температуры по сечению и длине заготовки. Из термостата нагретые заготовки поштучно с заданным циклом передаются в желоб прошивного трехвалкового стана винтовой прокатки. Далее заготовка толкателем, срабатывающим от фотодатчика, который фиксирует наличие нагретой заготовки в желобе, задается во вращающиеся рабочие валки и захватывается ими за счет сил трения, действующих на контактной поверхности металла с валками. Металл, перемещаясь по винтовой траектории, заполняет очаг деформации, образованный рабочими валками и оправкой, формоизменяясь в гильзу заданных размеров. Для получения дна заданной толщины оправка, установленная на оправочном стержне, выводится из очага деформации по сигналу фотодатчика, фиксирующего наличие горячего металла гильзы на выходе из валков, а оставшаяся донная часть заготовки продолжает обкатываться валками без оправки. Полученная гильза с дном выдается из валков толкателем входной стороны, проходящим сквозь очаг деформации [70] на наклонный желоб, по которому она сползает на непрерывно движущийся цепной транспортер. Цепным транспортером прошитая гильза с дном перемещается до упора. Упорная головка с оправочным стержнем и оправкой перемещается с помощью пневмопривода и рычажной системы в крайнее переднее положение, когда фотодатчик фиксирует наличие стакана на цепном транспортере и прошивной стан готов к прошивке следующей заготовки. По сигналу от этого фотодатчика снимается запрет на подачу заготовок в рабочие валки прошивного стана.

По сигналу от фотодатчика, который фиксирует наличие прошитой гильзы рядом с упором, в гильзу впрыскивается сжатым воздухом порция сухой технологической смазки, затем полая гильза от упора передается в приемный лоток калибровочного пресса толкателем с пневмоприводом по наклонному столу и в верхней точке наклонного стола скатывается в приемный лоток пресса, а толкатель возвращается в исходное положение после выдержки времени 0,5 секунды. Пресс оснащен двумя контейнерами: первый для калибрования донной части методом подпрессовки гильзы с дном пуансоном в

матрице, второй для калибрования наружной цилиндрической поверхности методом протяжки на пуансоне через профильное кольцо. Для заготовок деталей диаметром 30 мм и 40 мм может выполняться только одна операция калибрования: или донной части стакана или наружной поверхности.

В момент, когда гильза с дном попадает в приемный лоток включается главный привод пресса и в гильзу вводится пуансон, смонтированный в ходовом винте пресса, при подходе торца винта к приемному лотку последний опускается с помощью пневмопривода для свободного прохода винта над лотком, гильза с дном пуансоном перемещается вперед до матрицы первого контейнера и происходит калибрование донной части. Ход винта пресса задается на центральном пульте управления и рассчитывается исходя из необходимой величины обжатия донной части гильзы. После выдержки в течение 0,5...1 с электродвигатель пресса включается с противоположным направлением вращения вала для осуществления обратного хода винта с пуансоном. Одновременно дается команда на перемещение штока выталкивателя стакана из матрицы с помощью пневмоцилиндра, который после выдержки времени примерно 1 с устанавливается в исходное положение. После того, как пуансон со стаканом полностью вышел из первого контейнера, подается сигнал на поворот плиты пресса с помощью пневмопривода и на ось пресса устанавливается второй контейнер для осуществления операции калибрования наружной поверхности стакана. Гильза с пуансоном перемещается вперед путем вращения гайки пресса от электродвигателя и вводится в контейнер, в котором установлено протяжное кольцо, проталкивается через него и останавливается на заданной величине хода. Затем подается сигнал на опускание в прорезь контейнера сверху съемника, предназначенного для съема полой заготовки с пуансона. После этого электродвигатель пресса включается с противоположным направлением вращения вала, и винт пресса перемещается назад, пуансон выводится из контейнера, а протянутая через кольцо полая заготовка под собственным весом падает в прорезь контейнера снизу, и по металлическому желобу попадает



через распределитель в камеру контролируемого охлаждения, которая имеет три вращающихся шнека, образующих два «ручья». Благодаря распределителю, установленному на выходном конце наклонного желоба прессы, заготовки из прессы попеременно попадают в разные «ручья» камеры охлаждения.

После того, как пуансон и съемник выведены из контейнера и датчик зафиксировал, что стакан выпал в приемный желоб, пневмопривод получает сигнал на поворот плиты прессы в обратном направлении. Пресс готов к калиброванию следующей заготовки.

В паузах между операциями калибрования пуансон, матрица и протяжные кольца охлаждаются водой, и на их рабочую поверхность наносится технологическая смазка.

Заготовки, которые попали в камеру контролируемого охлаждения по «ручью», образованному двумя вращающимися шнеками, перемещаются в осевом направлении, одновременно вращаясь.

Охлаждение происходит путем распыления водовоздушной смеси внутри камеры охлаждения во время перемещения заготовок по шнековым транспортерам. Интенсивность подачи смеси регулируется вручную кранами, установленными в системе устройства водовоздушного охлаждения. Также предусмотрено отдельное охлаждение либо воздушным потоком, либо водой. Для этого необходимо перекрыть соответствующий кран, установленный на трубопроводе подачи воздуха или воды.

Для охлаждения шнекового транспортера изнутри с выходной стороны камеры к торцам труб шнеков подведена вода, которая, проходя по трубам, поступает обратно в систему оборотного водоснабжения.

Скорость перемещения заготовок по камере охлаждения регулируется путем изменения скорости вращения шнеков и зависит от времени цикла работы АЛВП.

На выходном конце камеры охлаждения витки крайних шнеков заканчиваются раньше, чем на центральном, благодаря чему охлажденная

заготовка падает с транспортера в короб, установленный под шнековым транспортером.

Подсчет количества заготовок в коробе ведется индуктивными датчиками, установленными на выходе из камеры охлаждения.

После наполнения короба полыми заготовками по сигналу счетчика заготовок оператор с главного пульта управления включает привод перемещения каретки и короб выдвигается в зону действия крана, которым переставляется на металлический поддон. В это время второй короб перемещается под шнековый транспортер и полые заготовки сбрасываются в него. После заполнения второго короба оператор включает привод каретки в обратном направлении, и под шнековый транспортер устанавливается снова пустой короб.

Температура заготовок на выходе из камеры охлаждения приблизительно 200 °С.

Величина хода каретки регулируется путем установки концевых датчиков, а также упорами, смонтированными на общей раме.

На основании представленного выше описания работы оборудования, а так же учитывая данные результатов моделирования процесса охлаждения заготовок, составлены операционные графики работы АЛВП по трем режимам (рисунки 3.43-3.45):

- прошивка заготовки, калибрование донной части гильзы с дном, протяжка гильзы с дном на пуансоне через кольцо;
- прошивка заготовки и калибрование донной части гильзы с дном;
- прошивка заготовки и протяжка гильзы с дном на пуансоне через кольцо.

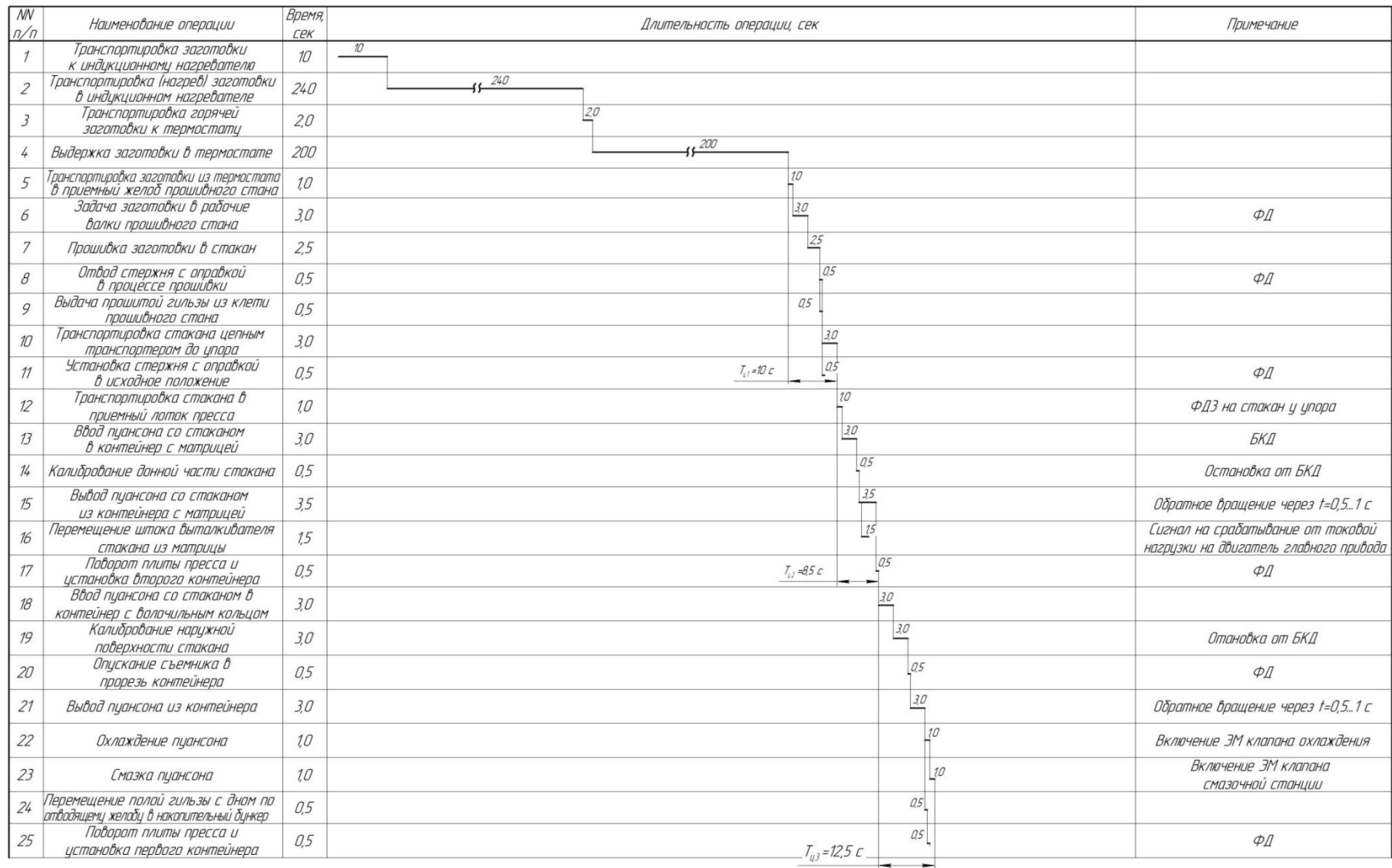


Рисунок 3.43 – Операционный график работы АЛВП с операциями прошивки, подпрессовки и протяжки

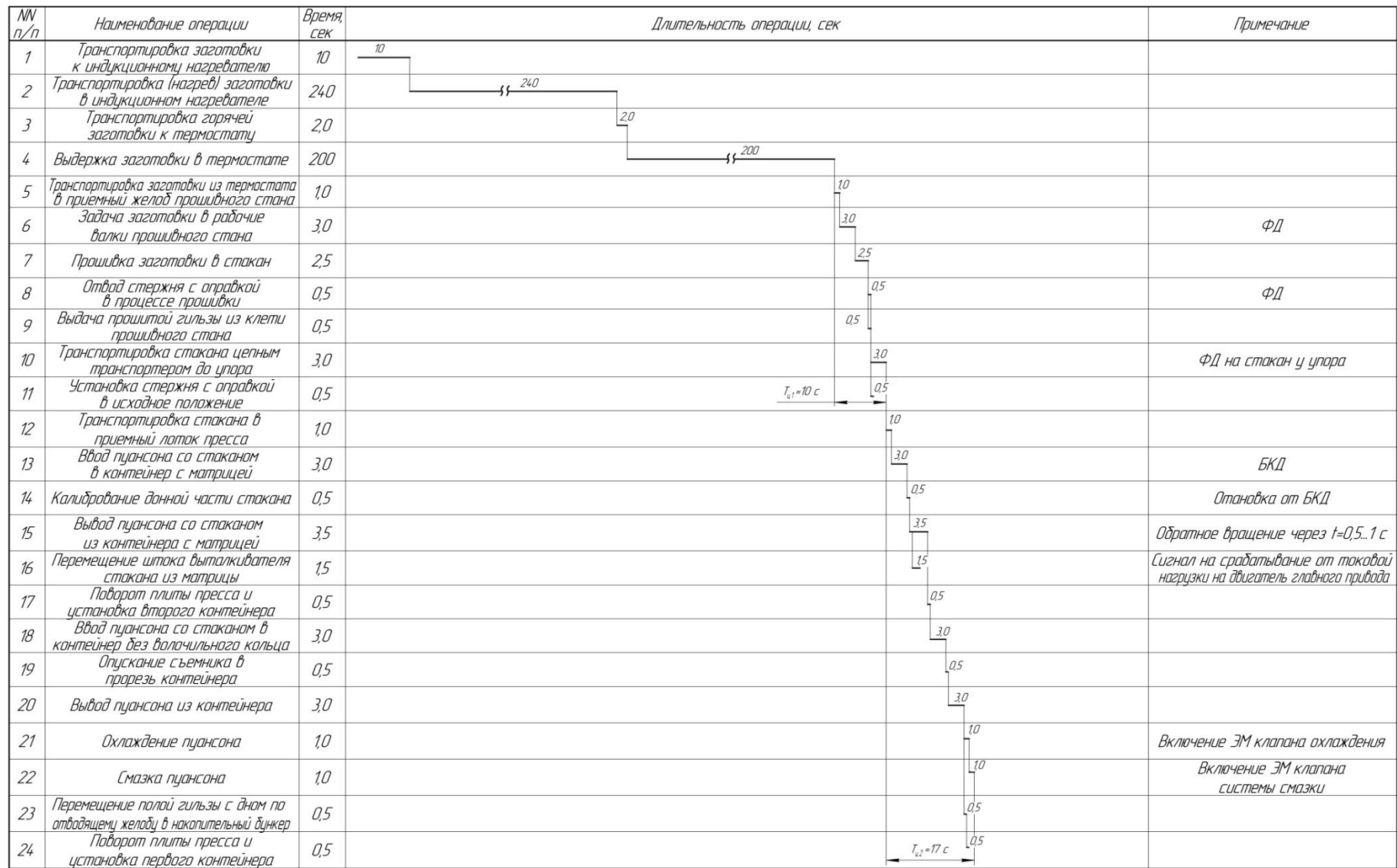


Рисунок 3.44 – Операционный график работы АЛВП с операциями прошивки и подпрессовки

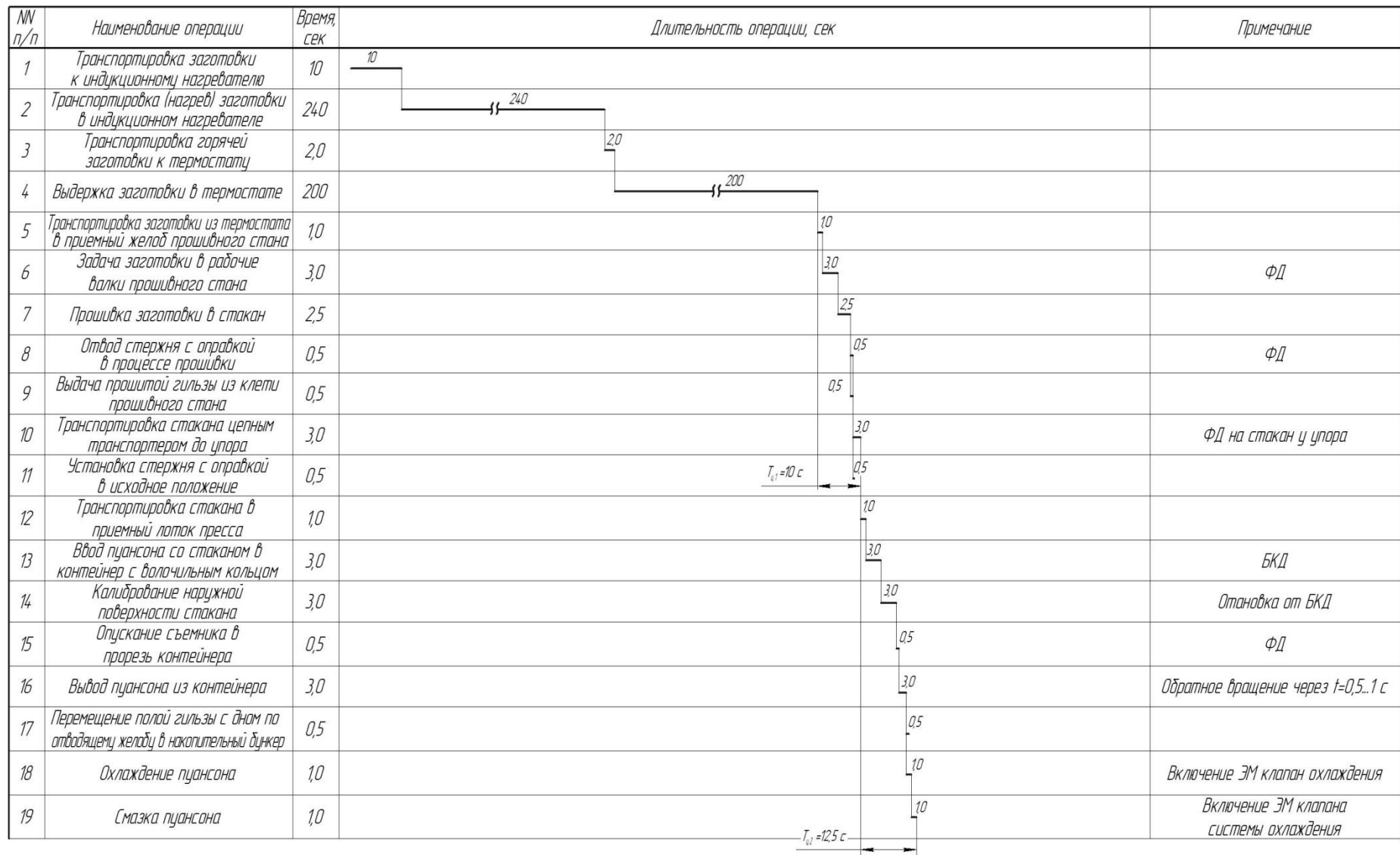


Рисунок 3.45 – Операционный график работы АЛВП с операциями прошивки и протяжки

При работе по второй схеме (прошивка и калибрование донной части) после выполнения калибрования донной части происходит поворот плиты и установка контейнера без протяжного кольца на ось пресса. Затем пуансон с заготовкой вводится в контейнер, после чего в прорезь контейнера опускается съемник, винт перемещается в обратном направлении, а заготовка перемещается по отводящему желобу в накопительный контейнер. После выхода пуансона из контейнера, плита при помощи пневмоцилиндра поворачивается и на ось пресса устанавливается контейнер с матрицей для калибрования донной части.

При работе по третьей схеме (прошивка и протяжка через кольцо) на оси пресса установлен контейнер с кольцом и после протяжки происходит снятие заготовки с пуансона при помощи съемника и заготовка перемещается по отводящему желобу в накопительный бункер. Поворот плиты пресса при работе по данному режиму не производится.

Циклограммы работы АЛВП представлены без операции охлаждения заготовок в камере контролируемого охлаждения.

Разработанный технологический процесс обеспечивает получение качественных полых заготовок с дном диаметром 30...60 мм с одного нагрева при работе оборудования в автоматическом режиме с циклом 20...30 с.

## **Глава 4. Опытнo-промышленное внедрение АЛВП**

Опытнo-промышленная автоматизированная линия винтовой прокатки (АЛВП) внедрена на предприятии АО «НПО «Прибор» в г. Ногинск.

Как показывает опыт внедрения подобного оборудования, первый этап обычно связан с достижением стабильной работы оборудования: механического, пневматического, электрического и средств автоматизации. На этом этапе обычно реализуется проектная технология, изготавливаются опытные и установочные партии изделий, обслуживающий персонал приобретает навыки работы на новом оборудовании.

На втором этапе освоения, когда уже достигнута стабильная работа оборудования, основные усилия исследователей и обслуживающего персонала направлены на совершенствование оборудования с целью вывода его на проектную мощность, определение рациональных технологических режимов и калибровок инструмента, обеспечивающих высокое качество изделий.

Согласно техническим условиям на полуую заготовку с дном контролируемыми параметрами являются: механические свойства, геометрические параметры, состояние внутренней и наружной поверхности. На поверхности не допускаются глубокие вмятины, забоины, продольные риски глубиной более 0,15 мм при ширине 10...15 мм.

Известно, что качество продукции, получаемой многооперационными технологическими процессами, является интегральной характеристикой [71]. Поэтому для достижения высокого качества изделий необходимо стремиться обеспечивать высокое качество полуфабрикатов на промежуточных операциях, уделяя повышенное внимание основным операциям.

### **4.1 Экспериментальные исследования и освоение технологии горячей прокатки и калибрования полых заготовок**

С целью отработки промышленной технологии, выбора наиболее рациональных режимов и калибровок рабочего инструмента на разработанном

оборудовании опытно-промышленной линии АЛВП были проведены экспериментальные исследования по прошивке и калиброванию заготовок диаметром 31,5 и 36 мм.

Основное внимание уделялось процессу прошивки, так как он является первой и основной операцией формоизменения в технологическом процессе, а значит, определяет качество и форму будущего изделия.

4.1.1 Методика исследований (характеристика оборудования и условия проведения эксперимента)

*Прошивка заготовок диаметром 31,5 мм.*

Экспериментальные исследования процесса прошивки заготовок диаметром 31,5 мм выполнены на трехвалковом прошивном стане «30-80» (рисунок 4.1), который входит в состав АЛВП.

Техническая характеристика стана приведена в таблице 4.1.



Рисунок 4.1 – Рабочая клеть трехвалкового прошивного стана «30-80»



Таблица 4.1 – Краткая техническая характеристика трехвалкового прошивного стана «30-80»

Наименование параметра	Значение
Рабочие валки:	
диаметр в пережиме, мм	150
длина бочки, мм	180
частота вращения, мин <sup>-1</sup>	60
угол раскатки, град	5
угол подачи, град	12
Температура нагрева заготовки, °С	1150...1160
Главный привод:	
тип	Индивидуальный
мощность электродвигателя, кВт	3х30
Тип выходной стороны	С осевой выдачей гильз
Производительность, шт./ч	до 200
Заготовка:	
диаметр, мм	30...80
длина, мм	65...250

В качестве исходного материала использовался калиброванный горячекатаный прутки из стали 50 диаметром 31,5 мм, который разрезался на штучные заготовки длиной 85 мм на ленточной пиле. Для улучшения условий вторичного захвата и уменьшения разностенности с одного торца заготовки путем сверления в холодном состоянии наносилось зацентровочное углубление диаметром 12 мм и глубиной 7...8 мм. Несоосность заготовки и зацентровочного углубления не превышала 0,3 мм. При этом с целью определения влияния зацентровочного углубления на образование разностенности при прошивке в трехвалковом стане часть заготовок была прошта без зацентровки.

Перед прошивкой заготовки нагревали в индукционном нагревателе проходного типа до температуры 1150...1160 °С с последующей выдержкой в термостате в течение 3 минут до температуры 1150 °С. Камера термостатирования выполнена в виде печи электросопротивления карусельного типа с подом, рассчитанным на 10 заготовок и предназначена для выравнивания температурного поля по поперечному сечению и длине заготовки. Время транспортировки заготовок от термостата до валков прошивного стана составляло 1,5...2 с.

Калибровка рабочих валков стана представлена на рисунке 4.2. Материал валков – сталь 35ХМ с твердостью рабочей поверхности около НВ 220...260. Для

улучшения захвата заготовки и повышения тянущей способности валков на входном участке длиной 60 мм была выполнена накатка глубиной 0,5...0,8 мм.

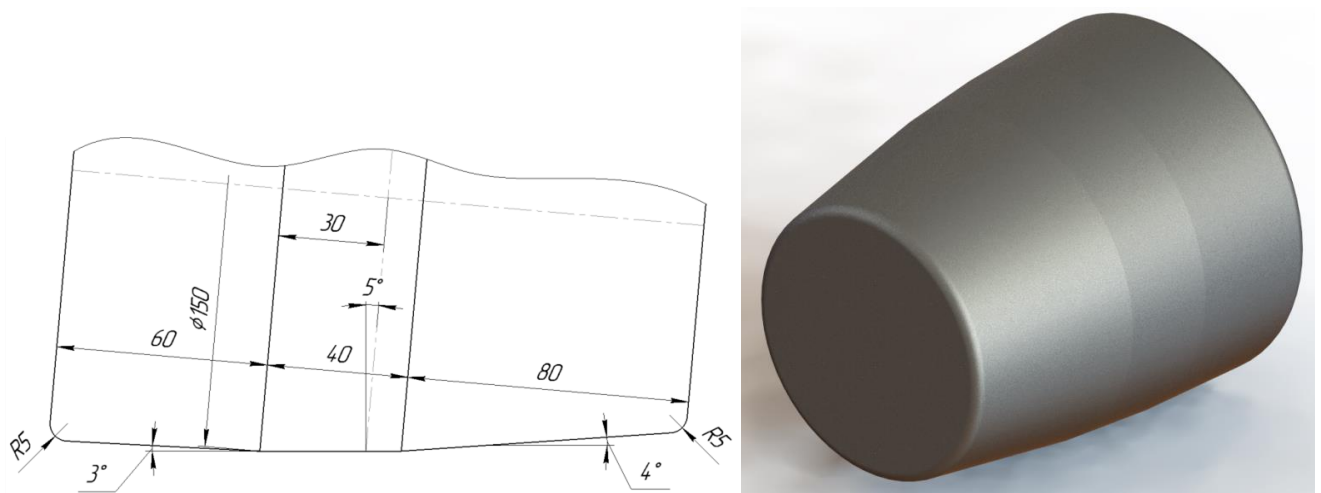


Рисунок 4.2 – Бочка валка прошивного стана «30-80»

Для прошивки заготовок использовались цельные оправки диаметром 21 мм с углом конусности рабочей поверхности 6° (рисунок 4.3). Оправки изготовлены из стали 4X5МФС с твердостью рабочей поверхности HRC 40...44. Общая длина консольного участка оправки вместе с оправочным стержнем составляет 310 мм.

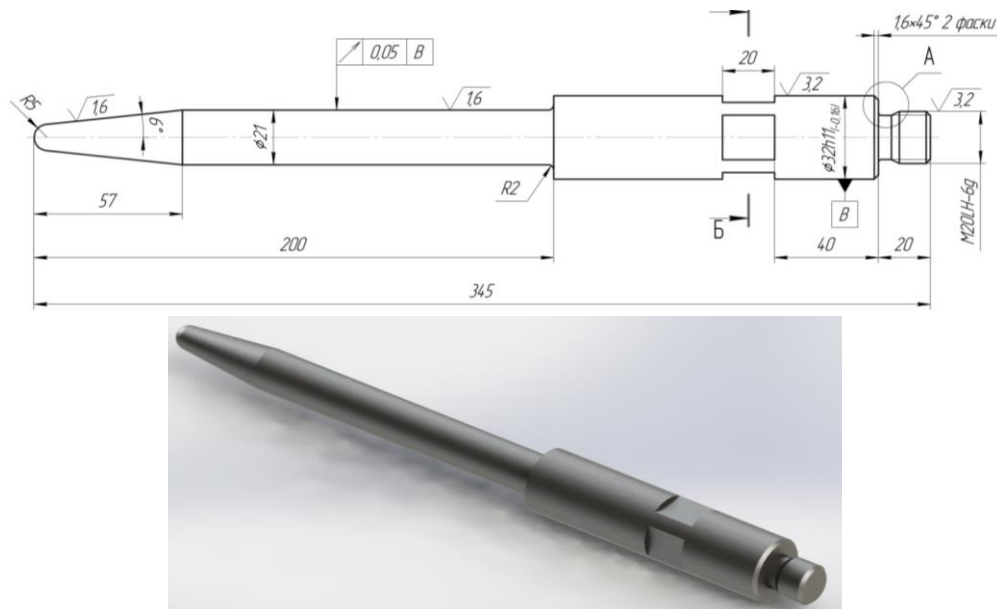


Рисунок 4.3 – Оправка с оправочным стержнем прошивного стана «30-80» для прошивки заготовки диаметром 31,5 мм

С целью образования слоя окалины на рабочей поверхности, которая предотвращает налипание деформируемого металла на инструмент, оправки термообрабатывали согласно режиму, который представлен на рисунке 4.4.

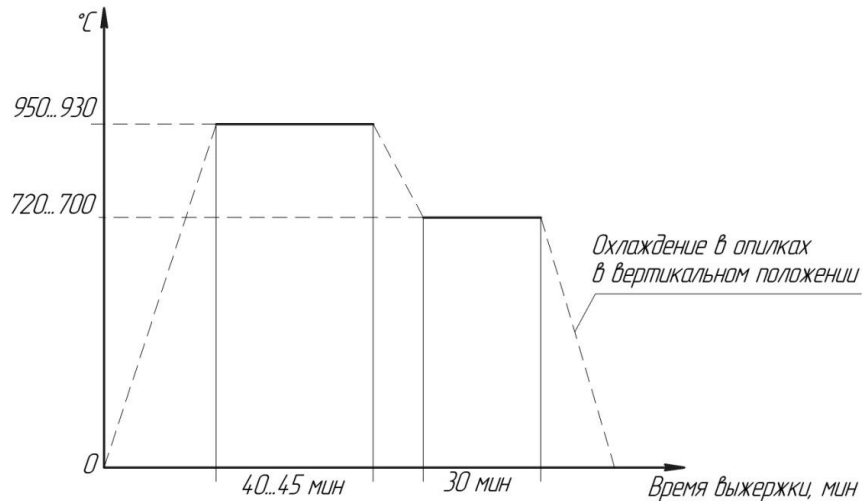


Рисунок 4.4 – График термообработки оправок прошивного стана АЛВП

Выходная сторона стана представляет собой специальное рычажное устройство, позволяющее получать полые заготовки с дном (рисунок 4.5). На общей раме 1 смонтирована упорная головка 2, которая перемещается по горизонтальным направляющим. Перед началом прошивки рычаги 4 разложены и упорная головка 2 с закрепленной в ней консольно оправкой находится в крайнем переднем положении. При этом конусная часть шпинделя упорной головки упирается в отверстие опорной плиты 3 для надежного центрирования оправки в очаге деформации. Нагретая до температуры прошивки заготовка из печи попадает в желоб прошивного стана, задается толкателем в валки, захватывается ими и прошивается на оправке. В момент, когда заготовка вышла из очага деформации прошивного стана на необходимое расстояние, от фотодатчика, установленного на выходной стороне стана, подается сигнал на срабатывание пневмоцилиндра 5 и система рычагов 4 складывается, благодаря чему упорная головка 2 отводится из очага деформации, а заготовка обкатывается дальше валками, выходит из валков и по наклонному лотку попадает на цепной транспортер 6, привод которого осуществляется от мотор-редуктора 7, далее

перемещается до упора, после чего толкателем 8 передается в приемный желоб прессы.

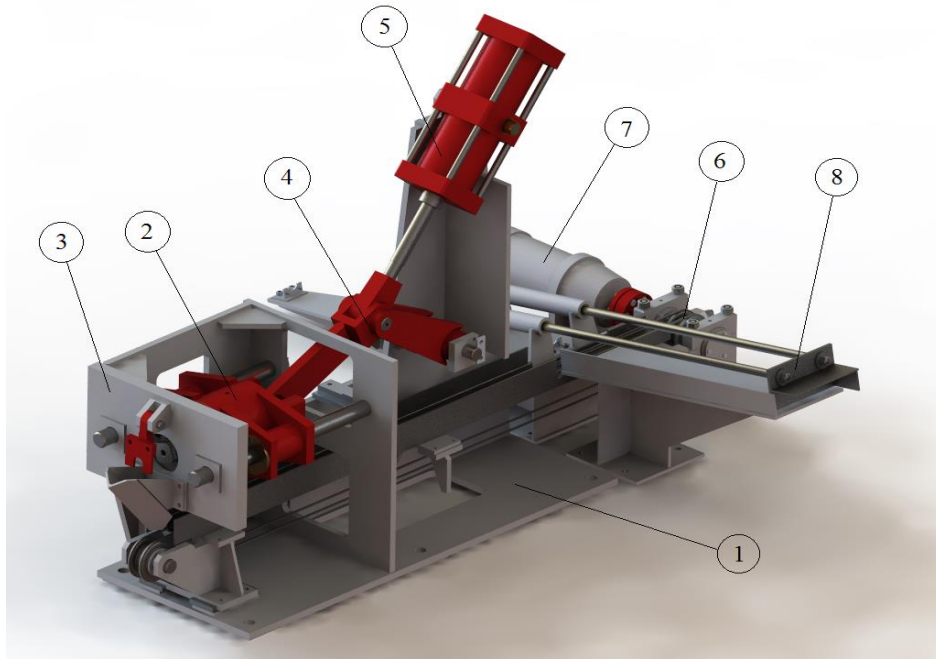


Рисунок 4.5 – Устройство для получения полых заготовок с дном:

1 – рама; 2 – упорная головка; 3 – опорная плита; 4 – рычажное устройство;  
5 – пневмоцилиндр; 6 – цепной транспортер; 7 – привод транспортера; 8 – толкатель

Для получения заданных геометрических размеров использовалась следующая настройка стана: расстояние между валками в пережиме  $B=27,5$  мм, выдвижение оправки за пережим валков  $C=15$  мм, угол подачи валков составлял  $\beta=12^\circ$ , угол раскатки  $\gamma=5^\circ$ , обжатие заготовки в пережиме  $\varepsilon_{\text{п}}=12,7$  %.

Время прошивки составляло 2...2,5 с. Процесс протекал стабильно, в общей сложности партия прокатанных заготовок составила 300 штук.

В паузах между прошивками оправка охлаждалась водой в течение 5...8 с. На валки через замкнутую систему охлаждения непрерывно подавалась вода. Значительного износа и потери формы прошивной оправки не зафиксировано.

После прокатки гильзы охлаждали на воздухе, подвергали визуальному осмотру, а затем измеряли их основные геометрические параметры. Замеры выполняли по схеме, применяемой при прокатке на стане МИСиС 130-Д (см. главу 2).

Внешний вид заготовок после прошивки представлен на рисунке 4.6.

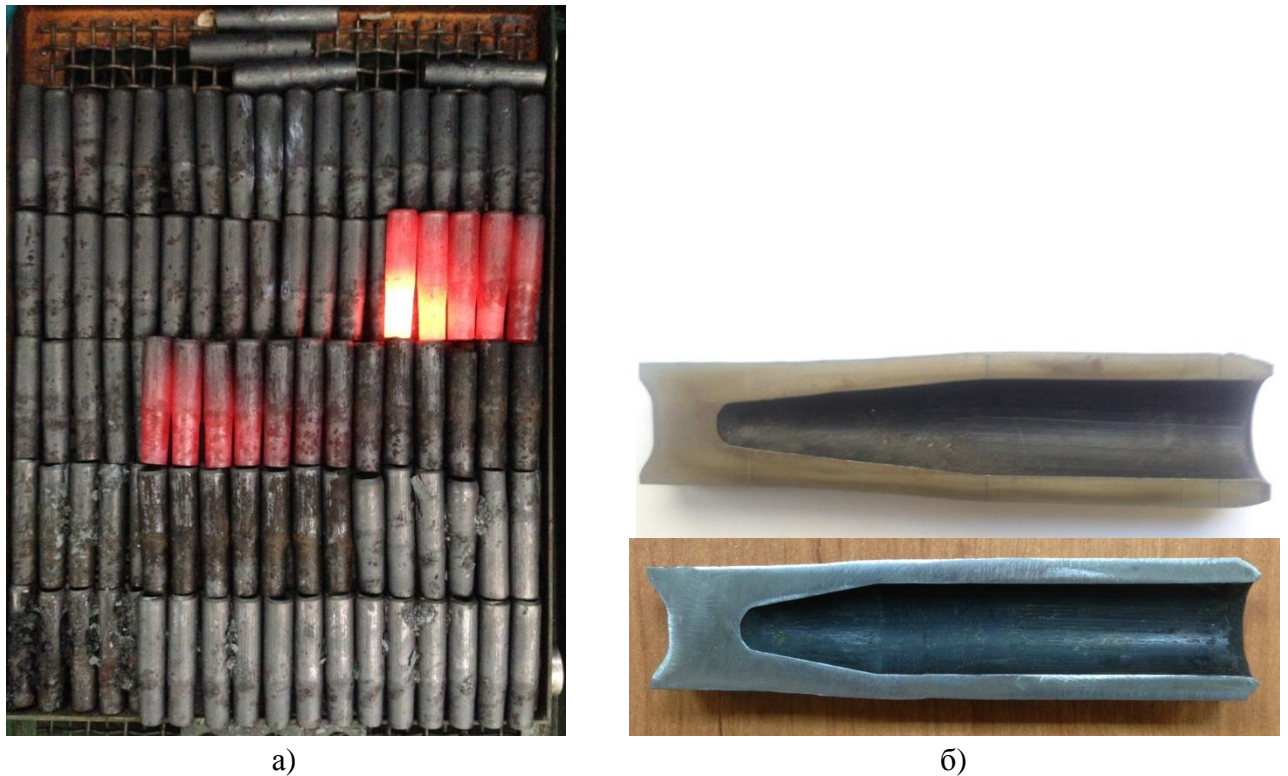


Рисунок 4.6 – Внешний вид прошитых заготовок деталей диаметром 30 мм (а) и продольные темплеты (б)

*Прошивка заготовок диаметром 36 мм.*

Эксперимент выполнен на оборудовании прошивного стана «30-80», входящим в состав АЛВП (см. рисунок 4.1 и таблицу 4.1).

В качестве исходного материала использовался горячекатаный прутки из стали 50 диаметром 36 мм, который разрезался на штучные заготовки длиной 71 мм на ленточной пиле. Для улучшения условий вторичного захвата и уменьшения разностенности с одного торца заготовки путем сверления в холодном состоянии наносилось зацентровочное углубление диаметром 16 мм и глубиной 7...8 мм. Несоосность заготовки и зацентровочного углубления не превышала 0,3 мм. Часть заготовок была прошта без предварительной зацентровки.

Перед прошивкой заготовки нагревали в индукционном нагревателе проходного типа до температуры 1150...1160 °С с последующей выдержкой в термостате в течении 3 минут до температуры 1150 °С. Время транспортировки заготовок от термостата до валков прошивного стана составляло 1,5...2 с.

Калибровка рабочих валков аналогична применяемой для прошивки заготовок диаметром 31,5 мм (см. рисунок 4.2).

Для прошивки заготовок были разработаны и испытаны два типа оправок диаметром 22 мм с углом конусности рабочей поверхности  $8^\circ$  (рисунок 4.7, а, б).

Оправки изготовлены из жаропрочного сплава ЭИ-131.

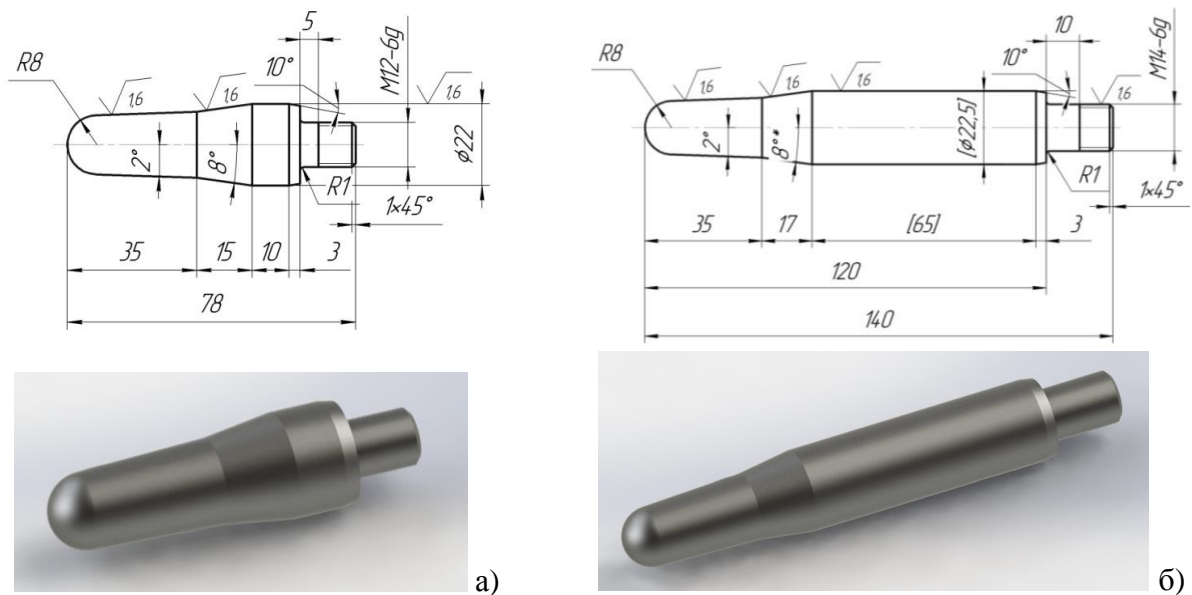


Рисунок 4.7 – Оправки прошивного стана «30-80» для прошивки заготовки диаметром 35 мм:  
а – с коротким цилиндрическим участком; б – с удлиненным цилиндрическим участком

Рабочая часть оправки соединяется с оправочным стержнем (рисунок 4.8), образуя при этом консольный стержень, который крепится в шпинделе упорной головки на выходной стороне прошивного стана. Общая длина консольного участка оправки с оправочным стержнем при этом составляет 300 мм, материал оправочного стержня – сталь 4Х5МФС с твердостью рабочей поверхности HRC 40...44.

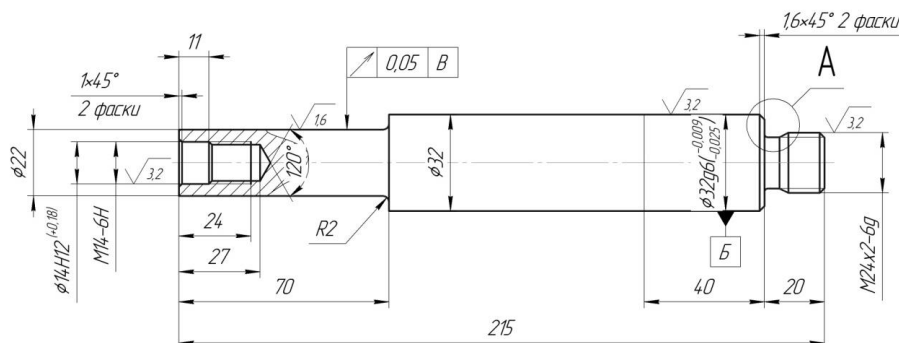


Рисунок 4.8 – Оправочный стержень для крепления оправки прошивного стана



Для получения заданных геометрических размеров использовалась следующая настройка стана: расстояние между валками в пережиме  $B=31$  мм, выдвижение оправки за пережим валков  $C=15$  мм, угол подачи валков составлял  $\beta=12^\circ$ , угол раскатки  $\gamma=5^\circ$ , обжатие заготовки в пережиме  $\varepsilon_n=13,9\%$ .

Время прошивки составляло 2...2,5 с. Процесс протекал стабильно, в общей сложности партия прокатанных заготовок составила 300 штук.

В паузах между прошивками рабочая поверхность оправки охлаждалась водой в течение 5...8 с. На валки через замкнутую систему охлаждения непрерывно подавалась вода. Значительного износа и потери формы прошивной оправки не зафиксировано.

После прокатки гильзы охлаждали на воздухе, подвергали визуальному осмотру, а затем измеряли основные геометрические параметры. Замеры выполняли аналогично с методом, описанным в главе 2, п. 2.1.

Внешний вид заготовок после прошивки представлен на рисунке 4.9.

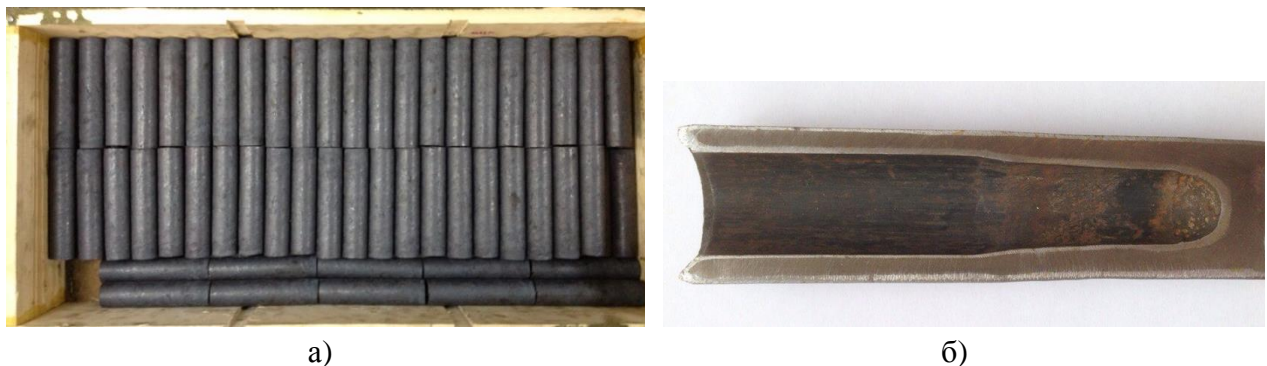


Рисунок 4.9 – Внешний вид прошитых заготовок деталей диаметром 30 мм (а) и продольный темплет (б)

#### 4.1.2 Анализ процесса прошивки и точности полых заготовок с дном

При прошивке полых заготовок с дном, имеющих различную профилированную поверхность внутренней полости, целесообразно проектировать инструмент, максимально возможно приближая его форму к форме готовой детали. Для подтверждения возможности использования прошивных







Рисунок 4.11 – Винтовые линии шага подачи на прошитых заготовках:

а – диаметром 31,5 мм (радиус носка оправки 5 мм); б – диаметром 36 мм (радиус носка оправки 8 мм)

По результатам измерений установлено, что на гильзах прошитых из заготовок диаметром 31,5 мм значение шага подачи практически не изменяется и составляет 20 мм у переднего торца и на участке раскатного конуса оправки и 21 мм у донной части гильзы. Для заготовок диаметром 36 мм шаг подачи увеличивается от переднего торца гильзы к донной части и принимает значения 17, 19 и 24 мм соответственно (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Результаты измерения шага подачи на прошитых гильзах для заготовок диаметром 31,5 и 36 мм

Место измерения	Шаг подачи $S_p$ , мм	
	Заготовка Ø31,5 мм	Заготовка Ø36 мм
Передний торец	20	17
Раскатной конус оправки	20	19
Донная часть	21	24

Заготовка задается в валки прошивного стана с определенной скоростью, отличной от нуля. Во время касания торца заготовки валков осевая скорость перемещения заготовки практически совпадает с осевой составляющей окружной скорости валков и происходит первичный захват. По мере заполнения очага

деформации растет площадь контактной поверхности металла с валком. При встрече заготовки с носком оправки резко возрастает осевое сопротивление, препятствующее перемещению металла вперед и шаг подачи уменьшается. После этого происходит формирование полости и раскатка заготовки на конической поверхности оправки, растет площадь контактной поверхности заготовки и вала и величина шага подачи вновь увеличивается. Во время отвода оправки из очага деформации сопротивление осевому перемещению заготовки резко снижается, прошивка заканчивается, и оставшаяся донная часть гильзы обкатывается без оправки. На этом участке шаг подачи увеличивается до максимальных значений, а коэффициент осевой скорости превышает единицу.

Осевое перемещение прошитой гильзы, вероятно, также увеличивает оправка при выходе из ее внутренней полости. При прошивке толстостенных гильз с отношением наружного диаметра к толщине стенки  $D/S=5,5\dots 6$  увеличения внутреннего диаметра полости относительно диаметра оправки («разбоя») практически не происходит, о чем свидетельствуют продольные риски и следы на поверхности внутренней полости. Установлено, что для заготовок диаметром 31,5 и 36 мм ( $D/S=5,5$  и  $5,8$  соответственно) максимальная величина подъема внутреннего диаметра относительно диаметра оправки составила 0,3 мм и практически не зависит от формы прошивной оправки, величины обжатия, температуры нагрева заготовки и других факторов.

Проведенный анализ показал, что прошивка на конической оправке с радиусом носика оправки 5 мм осуществляется с меньшим скольжением металла относительно рабочих валков. Значение шага подачи  $S_n$  при внедрении носика оправки в заготовку и далее для раскатного участка оправки увеличивается незначительно. Использование «тупой» оправки (радиус носика 8 мм) сопровождается повышенным скольжением в момент вторичного захвата и на раскатном участке оправки. При этом прокатка донной части гильзы без оправки протекает с увеличением  $S_n$  в обоих случаях.

В то же время, как показали опытно-промышленные испытания, износостойкость «тупой» оправки на 15-20 % выше.

На основании моделирования процесса прошивки заготовок на оправках различной формы в программном комплексе DeForm 3D установлено, что увеличение радиуса носика оправки не вызывает значительного роста силовых параметров процесса (рисунок 4.12). Так, при прошивке на оправке конической формы с радиусом носика 5 мм максимальное осевое усилие на оправку возникает на стадии раскатки гильзы и достигает 20 кН. Увеличение радиуса носика до 8 мм и изменение формы на более «тупую» повышает осевое усилие в среднем на 4...6 кН и достигает среднемаксимальных значений 24...25 кН.

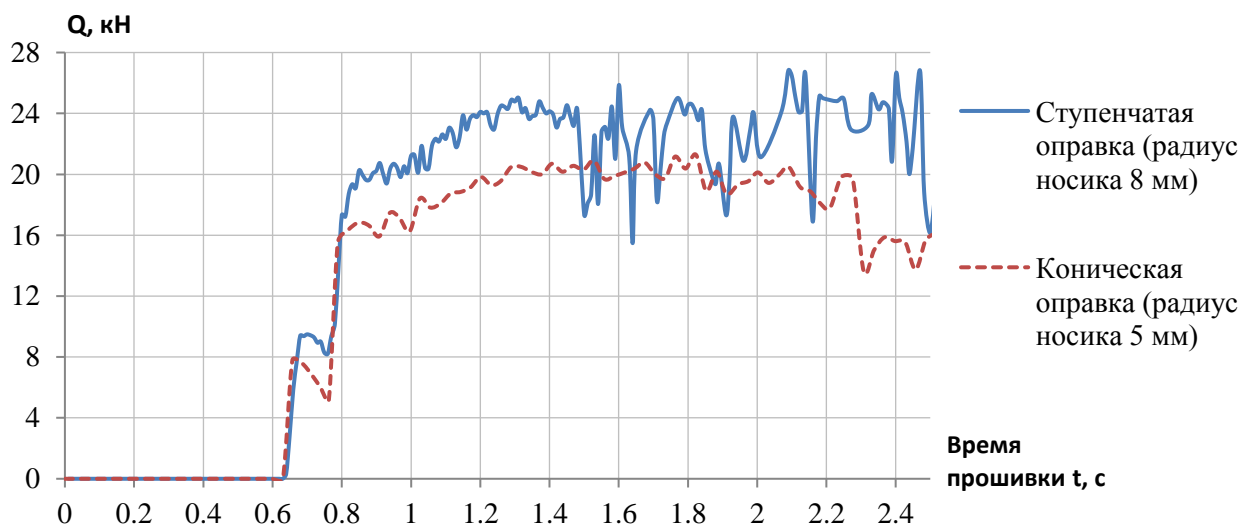


Рисунок 4.12 – Графики усилия металла на оправку при прошивке полых заготовок на оправках различной формы

Проведенные исследования показали, что при прошивке в трехвалковом стане обеспечивается большой запас тянущих сил, что позволяет использовать различную форму оправки, приблизив ее к профилю внутренней полости детали без значительного увеличения энергосиловых параметров. В частности, увеличение радиуса носика оправки с 5 до 8 мм привело к увеличению скольжения металла в основном в момент вторичного захвата.

Визуальный осмотр и измерения показали, что заготовки, которые прошивались без предварительной зацентровки, вызывали повышенные колебания оправочного стержня с оправкой во время прошивки, а абсолютная разностенность полученных гильз с дном составила 0,7...1,5 мм и 0,8...1,65 мм для заготовок диаметром 31,5 и 36 мм соответственно. Данные показатели

подтверждают целесообразность выполнения операции зацентровки перед прошивкой. При этом несоосность заготовки и зацентровочного углубления не должна превышать 0,2 мм, что затруднительно получить горячим способом зацентровки заготовок малого диаметра. Таким образом, в технологическом процессе получения качественных полых заготовок с дном необходима операция зацентровки исходных заготовок в холодном состоянии механическим способом, что улучшает условия вторичного захвата и способствует получению точных заготовок.

Геометрические размеры полученных гильз с дном представлены ниже в таблицах 4.3 и 4.4 (данные представлены для 20 шт. из партии).

Таблица 4.3 – Геометрические параметры прошитых полых гильз с дном из заготовок диаметром 31,5 мм на трехвалковом прошивном стане «30-80»\*

№ п/п	Геометрические параметры полученных заготовок, мм									
	Толщина стенки				$\Delta S$	$D_{\text{н}}$	$d_{\text{в}}$	$h_{\text{yt}}$	$L$	$l_{\text{к}}$
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$						
1	5,8	5,65	5,9	5,9	0,25	33,4	21...21,3	4	132	119,5
2	5,8	5,8	5,7	5,9	0,2	33,2		4,2	130	118,5
3	6,0	5,8	5,6	5,8	0,4	33,3		4,5	133	118,5
4	5,75	5,7	5,9	6,05	0,35	33,2		4	128	118
5	5,8	5,8	5,85	5,8	0,05	33,3		4,2	132	118
6	5,9	5,8	5,75	5,8	0,15	33,3		4,5	132	117
7	5,75	5,7	5,9	6,0	0,3	33,4		4	129	119
8	5,9	5,7	5,8	6,0	0,3	33,2		4	128	117
9	5,7	5,9	5,8	5,7	0,2	33,4		4,2	132	120
10	5,9	5,8	5,85	5,8	0,1	33,3		4	130	117
11	5,8	5,9	5,8	5,7	0,2	33,1		4,1	130	117
12	5,8	5,9	5,8	5,7	0,2	33,3		4,5	132	118
13	5,9	5,6	5,8	5,9	0,3	33,2		4	132	116
14	5,7	5,75	5,95	5,8	0,25	33,3		4,1	132	116
15	5,7	5,8	5,9	5,9	0,2	33,2		4	130	120
16	5,9	5,8	5,7	5,8	0,2	33,5		4	133	120
17	5,7	5,9	5,95	5,8	0,25	33,5		4,2	132	119
18	5,8	5,7	5,9	6,0	0,3	33,2		4,3	133	117
19	5,65	5,8	6,0	5,9	0,35	33,1		4	131	118,5
20	5,8	5,8	5,7	5,9	0,2	33,3		4,2	132	118

\*Примечание: температура прокатки  $T=1150$  °С, настройка прошивного стана:  $B=27,5$  мм,  $C=15$  мм,  $\delta_{\text{оп}}=21$  мм,  $\beta=18^\circ$ ,  $\gamma=5^\circ$ ,  $\varepsilon_{\text{п}}=12,7$  %.

Таблица 4.4 – Геометрические параметры прошитых полых гильз с дном из заготовок диаметром 36 мм на трехвалковом прошивном стане «30-80»\*

№ п/п	Геометрические параметры полученных заготовок, мм										
	Толщина стенки				$\Delta S$	$D_n$	$d_b$	$d_d$	$h_y$	$L$	$l_k$
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$							
1	5,8	6,0	6,2	6,2	0,4	32,6...32,9	22,2...22,3	31,7-31,9	2,0	127,4	115,0
2	6,0	6,2	6,0	5,9	0,3	32,6...32,9	22,1...22,3	31,6-31,7	1,7	127,3	116,0
3	6,3	6,0	6,1	6,1	0,3	32,5...32,8	22,0...22,2	31,9-32,1	3,0	128,1	116,0
4	6,0	6,1	6,0	6,4	0,4	32,6...32,9	22,05...22,2	32,0-32,1	3,1	128,6	115,0
5	6,3	5,9	6,1	6,2	0,4	32,7...33,0	22,1...22,2	31,6-31,7	2,1	127,5	116,0
6	6,2	6,1	5,9	6,2	0,3	32,5...32,8	22,05...22,2	32,0-32,2	3,0	129,5	116,0
7	6,0	6,0	6,2	6,1	0,2	32,6...32,9	22,1...22,2	31,7-31,9	2,8	129,5	117,0
8	6,0	6,1	6,2	6,1	0,2	32,6...32,9	22,1...22,3	31,7-31,8	2,4	130,0	116,0
9	6,0	6,2	6,2	6,0	0,2	32,4...32,9	22,1...22,2	32,3-32,5	2,3	128,7	115,0
10	6,0	6,0	6,1	5,8	0,3	32,7...33,0	22,1...22,3	31,5-31,7	2,5	129,3	117,0
11	5,8	6,0	5,7	5,9	0,3	32,5...32,8	22,0...22,3	31,2	2,7	128,3	117,0
12	5,9	6,0	6,1	6,0	0,2	32,7...33,0	22,0...22,2	31,5...31,6	2,2	127,4	116,0
13	5,9	6,0	5,8	5,9	0,2	32,5...32,9	21,9...22,1	31,9...32,0	1,1	128,1	116,0
14	5,8	6,0	5,9	5,8	0,2	32,5...32,9	22,0...22,2	31,3...31,4	1,5	127,4	115,5
15	5,8	6,0	5,8	6,0	0,2	32,5...33,0	22,0...22,1	31,5...31,8	2,5	127,7	116,0
16	5,8	6,0	6,0	6,0	0,2	32,5...32,9	21,95...22,05	32,0...32,2	1,3	129,5	117,0
17	5,9	6,05	5,9	6,0	0,15	32,5...33,0	22,0...22,2	31,5...31,6	2,5	129,7	117,0
18	6,0	6,0	5,9	5,95	0,1	32,5...32,7	22,0	31,3...31,5	2,1	127,3	116,0
19	6,0	5,8	5,9	5,9	0,2	32,4...32,8	21,9...21,0	31,2...31,4	1,5	128,6	115,8
20	6,1	6,0	6,0	6,15	0,15	32,5...32,9	21,9...21,0	31,3...31,4	2,1	129,3	116,5

\*Примечание: температура прокатки  $T=1150$  °С, настройка прошивного стана:  $B=31$  мм,  $C=15$  мм,  $\delta_{оп}=22$  мм,  $\beta=18^\circ$ ,  $\gamma=5^\circ$ ,  $\varepsilon_n=13,9$  %.

На основании данных по замерам геометрических параметров для всех полученных заготовок построены частотные кривые абсолютной разностенности (рисунок 4.13).

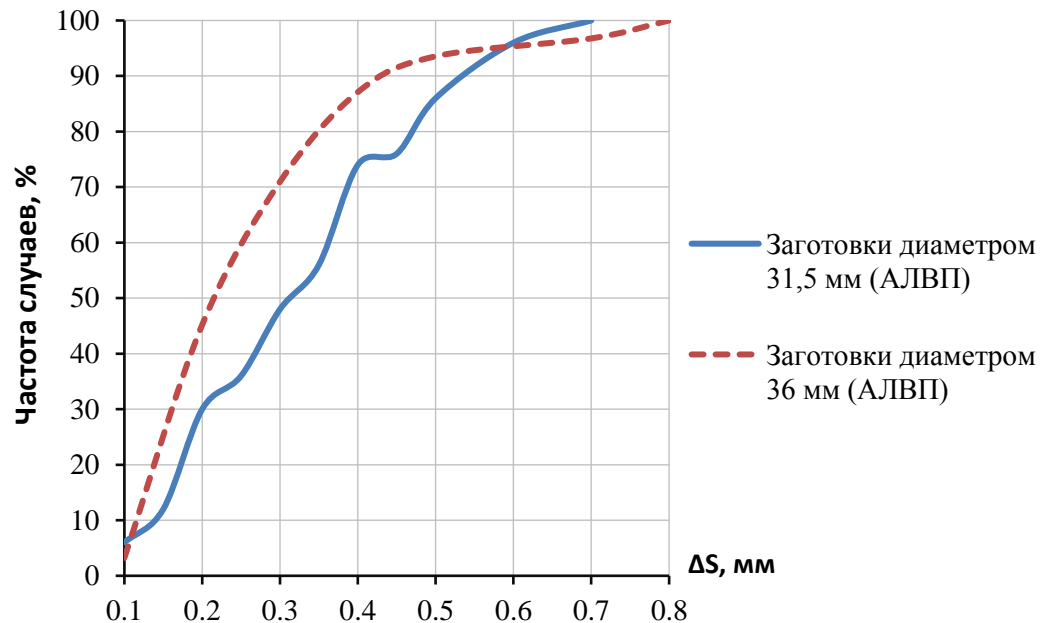


Рисунок 4.13 – Частотные кривые абсолютной разностенности прошивных заготовок диаметром 31,5 и 36 мм

Установлено, что при прошивке заготовок диаметром 31,5 мм показания разностенности имеют более нестабильный характер и в среднем на 15...20 % выше, чем при прошивке заготовок диаметром 36 мм. Однако для общей массы заготовок (95 %) из двух партий показатель разностенности одинаковый и не превышает 0,6 мм.

При проведении исследований использовались три различные конструкции оправок: цельная оправка-стержень (для прошивки заготовок диаметром 31,5 мм), оправка с коротким цилиндрическим пояском и оправка с удлиненным цилиндрическим пояском (для прошивки заготовок диаметром 36 мм).

Во время прошивки на оправке с коротким пояском отвод ее из очага деформации был затруднен из-за «окова» оправочного стержня передним торцом гильзы. Поэтому для прошивки опытной партии заготовок выбрана оправка с удлиненным цилиндрическим пояском, превышающим глубину внутренней камеры заготовки. Кроме того, для повышения прочности увеличен диаметр

резьбы с M12 до M14 и на 5 мм удлинен центрирующий пояс, что обеспечивает соосность оправки и державки. Такая конструкция, в отличие от цельной оправки позволяет по мере износа заменять только рабочую часть оправки при сохранении державки, что значительно снижает затраты на инструмент, а применение в качестве материала оправок жаропрочных сплавов может в несколько раз повысить износостойкость инструмента.

## 4.2 Проектирование технологического процесса и инструмента

### 4.2.1 Методика определения исходной заготовки и полуфабрикатов

Расчет технологического процесса, размеров исходной заготовки и полуфабрикатов ведется по традиционной схеме против хода прокатки, т.е. от готовой детали к исходной заготовке.

Размеры калиброванной заготовки после операции протяжки определяются исходя из размеров готового корпуса, допусков и припусков на механическую обработку (рисунок 4.14).

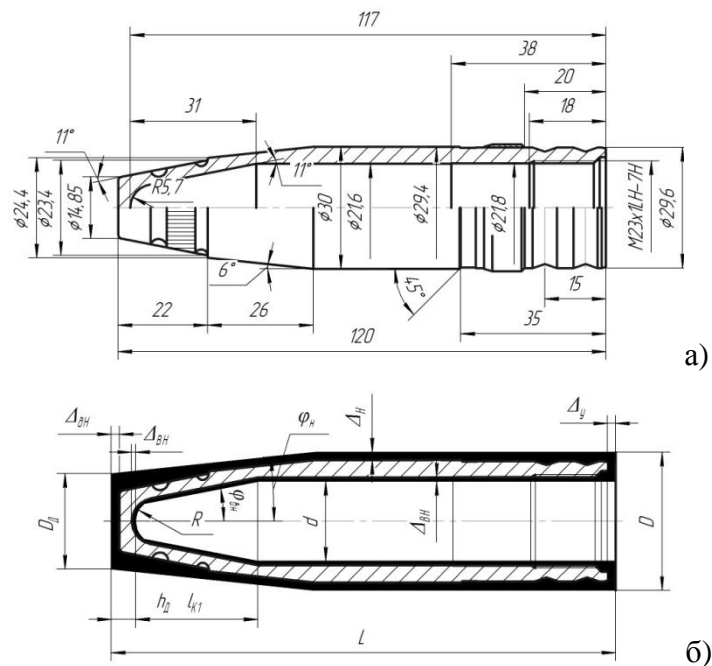


Рисунок 4.14 – Размеры готовой детали (а) и заготовки с припусками на механическую обработку (б)



Допуски на линейные и диаметральные размеры определяются износом инструмента, неопределенностью оформления поверхностей заготовки из-за колебания условий трения на контакте металла с инструментом, температурно-скоростных условий и других факторов. Кроме того, для обеспечения установленных допусков при заданном классе шероховатости поверхности назначают припуски на последующую механическую обработку. В припуски должны входить глубина дефектного слоя металла с учетом возможных забоин и вмятин от окалины, обезуглероженного слоя, рисков, задиров, мелких складок и зажимов и пр., длина утяжки переднего и заднего торцев гильзы, а также радиальное биение, обусловленное отклонениями формы заготовки от идеальной.

Припуски, допуски, штамповочные уклоны, радиусы закруглений регламентированы ГОСТ 7505-89. Однако использование рекомендаций данного ГОСТа затруднительно из-за специфических особенностей технологии, включающей неуставившиеся режимы винтовой прошивки, подпрессовки, протяжки и сложной формы полый профилированной заготовки. В связи с этим, все допуски и припуски на механическую обработку назначаются исходя из данных, полученных при проведении экспериментальных исследований, а также опыта прокатки полых заготовок и их механической обработки.

Качество изделия зависит от того, будет ли в дальнейших операциях механическая обработка достаточна для полного снятия обезуглероженного слоя. Изделие с обезуглероженной поверхностью склонно к закалочным трещинам, к короблению, обладает меньшей сопротивляемостью против статических нагрузок и требует специальной термообработки для получения заданных механических свойств.

Обезуглероживание начинается обычно еще в нагревательной печи, где металл находится при высокой температуре.

Как установлено рядом исследователей [72], на углеродистой стали при температуре ниже 850 °С, обезуглероживание отсутствует, так как процессы образования окалины и обезуглероживания протекают с одинаковой скоростью.

Шульц и Нимейер [72], исследуя обезуглероживание в воздухе, пришли к следующим выводам: характер поверхности не влияет на ход процесса обезуглероживания; глубина обезуглероживания пропорциональна температуре; скорость обезуглероживания больше в начале процесса (при одинаковой температуре).

Для выбора значений припусков на механическую обработку необходимо знать толщину дефектного слоя, образующегося при данной схеме ведения технологического процесса, поэтому были проведены исследования по определению величины обезуглероженного слоя на трех стадиях: в исходном состоянии поставки заготовки, после нагрева и после прошивки и калибрования. Для этого выбраны три образца: исходная заготовка, заготовка после нагрева в индукторе и выдержки в термостате, и полая заготовка, полученная путем прошивки и калибрования на прессе с одного нагрева.

Металлографический анализ заготовок выполнен по ГОСТ 1763-68. Определение величины обезуглероженного слоя производилось при помощи окуляра и измерительной линейки с ценой деления 0,01 мм после удаления слоя печной окалины гальваническим способом.

Установлено, что на заготовке из стали 50 в исходном состоянии обезуглероженный слой отсутствует (рисунок 4.15, а). На рисунке 4.15, б представлена структура заготовки после нагрева в индукторе до температуры 1150...1170 °С и выдержке в термостате в течение 2 минут при температуре рабочей камеры печи 1150 °С. На заготовке образовался слой окалины величиной 1,2 мм. После ее удаления был измерен обезуглероженный слой, который составил 0,33 мм. После операций прошивки и калибрования на прессе величина обезуглероженного слоя согласно измерениям, составила 0,17 мм (рисунок 4.15, в). Таким образом, величина минимального припуска на механическую обработку не должна быть меньше, чем 0,34 мм на диаметр заготовки.

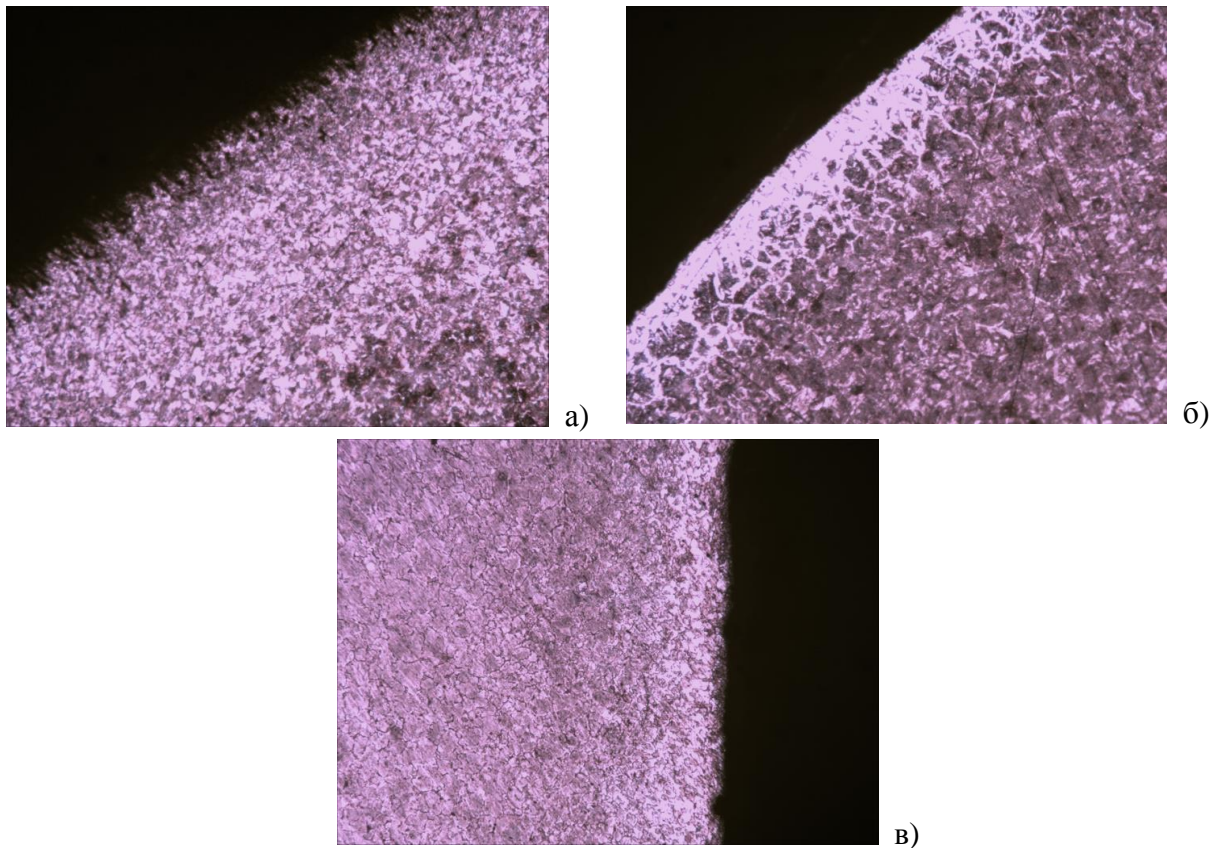


Рисунок 4.15 – Структура заготовок из стали 50 в исходном состоянии поставки (а), после нагрева (б), после прошивки и калибрования (в). Увеличение 100х

При определении размеров и допусков калиброванной заготовки необходимо также учитывать неравномерное распределение температуры по ее длине после окончания операции протяжки. Согласно экспериментальным данным и проведенным компьютерным экспериментам моделирования процессов прошивки и калибрования температура донной части полой заготовки после операции протяжки составляет 950 °С, далее от дна по длине конусной части внутренней камеры снижается до 900 °С, а на оставшейся длине имеет температуру 830...850 °С. Для получения заданных размеров, необходимо учитывать изменение (усадку) размеров детали при охлаждении в зависимости от температуры. При этом диаметр полой заготовки в горячем состоянии в  $i$ -ом сечении необходимо определять по формуле:

$$D_i^T = (1 + \alpha t) D_i^X, \quad (4.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;

$t$  – температура  $i$ -го сечения заготовки в момент окончания протяжки;

$D_i^X$  – диаметр заготовки в холодном состоянии.

Общую длину заготовки после калибрования  $l_1^F$  допустимо определять по формуле:

$$l_1^F = (1 + \alpha t_{cp}) l_1^X, \quad (4.2)$$

где  $l_1^X$  – длина заготовки в холодном состоянии;

$t_{cp}$  – средняя температура по длине заготовки, в первом приближении равная 900 °С.

Основные геометрические параметры заготовок после каждой операции технологического процесса представлены на рисунке 4.16.

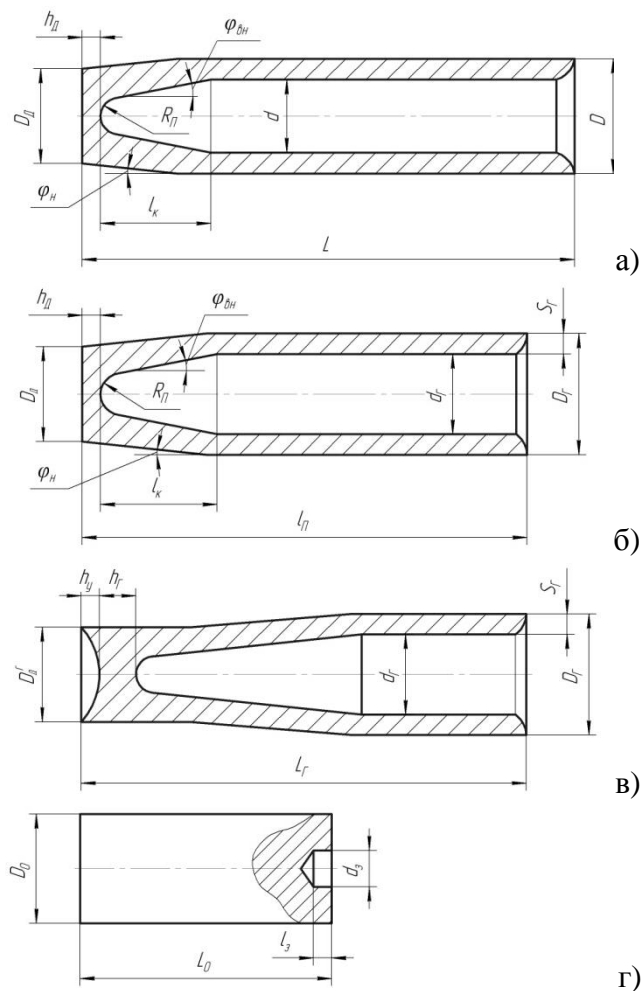


Рисунок 4.16 – Основные размеры заготовок после протяжки (а), калибрования донной части (б), прошивки (в) и исходной заготовки (г)

*Построение профиля детали после протяжки.*

Ко всем размерам детали в холодном состоянии должны быть добавлены припуски на механическую обработку.

По разработанному чертежу полый профилированной заготовки определяют ее объем и массу с учетом угара металла при нагреве. Для индукционного нагрева с последующей непродолжительной выдержкой в термостате угар принимаем равным 0,5...1 %.

Исходя из размеров разработанной профилированной заготовки и учитывая температурное расширение металла в горячем состоянии выполняется построение профиля детали после протяжки, основными размерами которой являются:

- общая длина  $L$ , которая принимается с учетом утяжки на переднем торце заготовки гильзы;
- наружный диаметр  $D$  с учетом общего припуска по диаметру;
- внутренний диаметр  $d$  с припусками для расточки внутренней поверхности камеры;
- толщина дна  $h_d$  с учетом удаления дефектного слоя на внутренней и наружной стороне донной части;
- наружный диаметр донной части  $D_d$ , который не может быть меньше, чем наружный диаметр донной части на прошитой гильзе, что обусловлено характером течения металла в матрице при выполнении подпрессовки. Поэтому размер определяется из величины обжатия заготовки в пережиме валков при прошивке:

$$D_d = D_0(1 - U_{II}); \quad (4.3)$$

где  $D_0$  – диаметр исходной заготовки;

$U_{II}$  – обжатие заготовки в пережиме;

- наружный и внутренний углы конусности донной части  $\varphi_n$  и  $\varphi_{вн}$ , которые по возможности, приближают по форме и размеру к значению размеров детали;
- радиус донной части  $R_{II}$ .

*Построение профиля детали после подпрессовки донной части.*

Исходной заготовкой для протяжки служит подпрессованный стакан (рисунок 4.16, б). Так как на операции подпрессовки деформирование осуществляется только в донной части полый гильзы, то ее внутренний диаметр

принимается большим диаметра полой заготовки после протяжки на 1...1,5 мм для свободной зарядки пуансона:

$$d_r = d + (1...1,5). \quad (4.4)$$

Параметры диаметра донной части  $D_d$ , радиуса донной части  $R_d$ , толщина дна  $h_d$ , углы конусности  $\varphi_n$  и  $\varphi_{вн}$  имеют такие же размеры, что и у заготовки после протяжки.

Толщина стенки подпрессованного стакана назначается исходя из выбора величины обжатия при протяжке. С одной стороны, минимальная величина обжатия по стенке должна обеспечивать плотное прилегание внутренней поверхности заготовки к пуансону для оформления внутреннего профиля каморы. В противном случае при финишной механообработке возможно образование черновин и дефектных пятен. С другой стороны, максимальное обжатие при протяжке не должно вызывать высоких нагрузок на инструмент, которые могут привести к его поломке. Кроме того, большие значения обжатия при протяжке через кольцо могут способствовать быстрому его износу. В результате, на наружной поверхности полых заготовок образуются следы в виде рисок, раковин и глубоких задиров, а диаметральные размеры имеют большие отклонения от назначенных допусков.

Для определения рациональных значений обжатия по толщине стенки с точки зрения точности получаемых деталей, энергосиловых параметров ведения процесса и износа инструмента были проведены эксперименты по калиброванию полых заготовок с дном в программном комплексе DeForm 3D и на оборудовании АЛВП.

На основании проведенного МКЭ моделирования процесса протяжки с различным обжатием по толщине стенки построены графики осевого усилия  $Q$  на пуансон со стороны заготовки (рисунок 4.17). Установлено, что при обжатии по стенке 5 и 7 % в начальный момент времени возникает резкий рост усилия, что, вероятно, может быть связано с недостаточным центрированием полой заготовки в протяжном кольце из-за малой площади контакта. При величине обжатия 10 и 15 % процесс начинается при более плавном возрастании усилия, однако в

процессе протяжки усилия имеют большие колебания, что объясняется нестабильностью условий трения на контакте металла с инструментом при большей площади контакта.

При окончании процесса протяжки (время ~ 1,8 с на графике) вне зависимости от величины обжата возникает незначительный рост усилий, после чего происходит резкое его снижение.

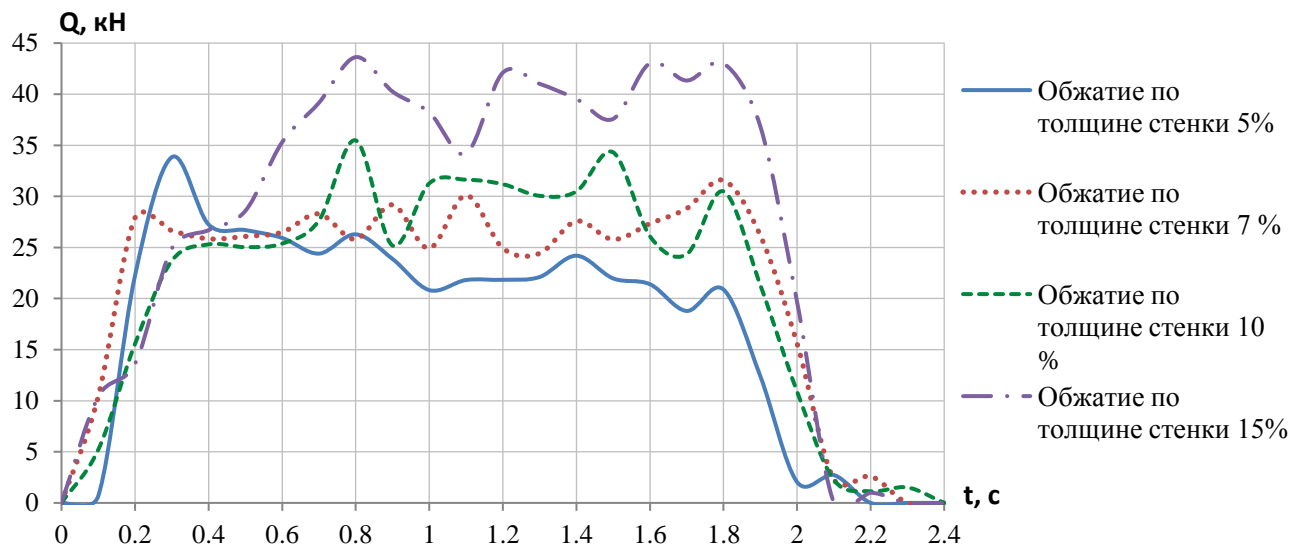


Рисунок 4.17 – Графики осевого усилия на пуансон при протяжке заготовок диаметром 36 мм

На калибровочном прессе АЛВП выполнены эксперименты по протяжке заготовок через кольцо с обжатием по толщине стенки 5 и 15 %. После калибрования производили осмотр наружной и внутренней поверхностей заготовок, а также состояния поверхности рабочего инструмента (протяжных колец и пуансона).

Визуальный осмотр показал, что на внутренней поверхности заготовок, полученных с обжатием по стенке 5 %, имеются зоны, которые не соприкасались с рабочей поверхностью пуансона (рисунок 4.18).



Рисунок 4.18 – Образцы заготовок с неплотным прилеганием внутренней поверхности к пуансону при протяжке через кольцо с обжатием по толщине стенки 5%

Эти зоны расположены в основном на конусной части пуансона или в начале цилиндрической его части, где обжатие по стенке имеет минимальное значение.

Полученные заготовки из второй партии показали, что обжатие по толщине стенки 15% при протяжке вызывает значительный рост усилий на инструмент, износ рабочей поверхности и налипание металла на протяжное кольцо (рисунок 4.19, а) и, как следствие, образование глубоких рисок и задиrow на наружной поверхности заготовок (рисунок 4.19, в).



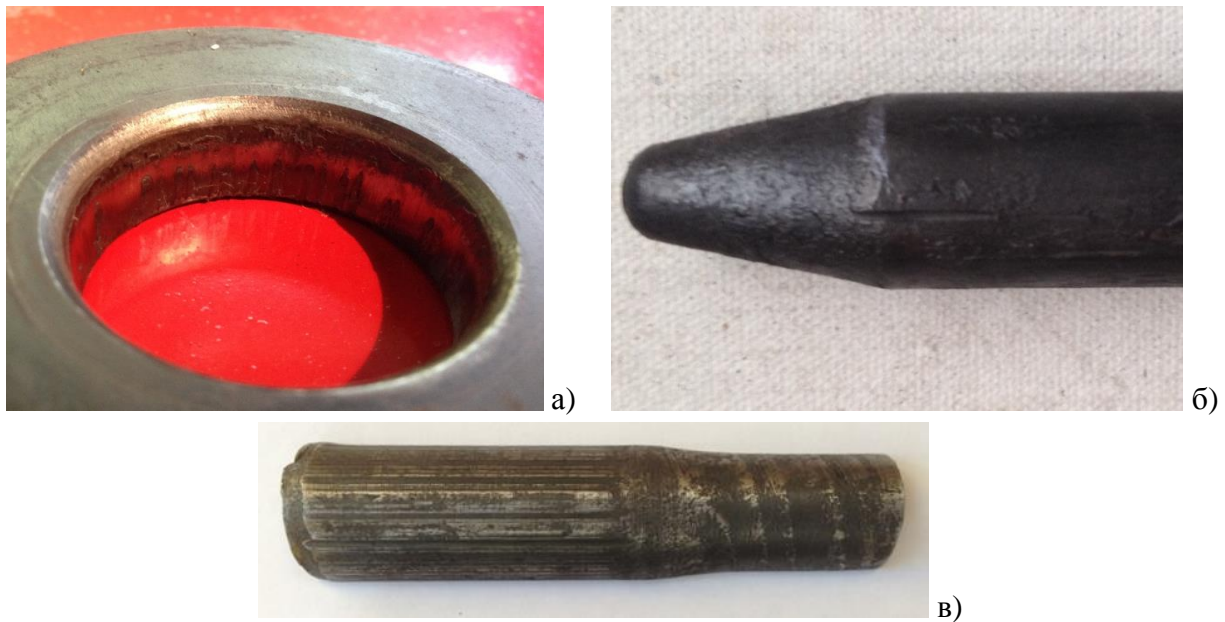


Рисунок 4.19 – Износ кольца (а), пуансона (б) и заготовки (в) после протяжки с обжатием по толщине стенки 15%

Таким образом, при проектировании технологии целесообразно выбирать толщину стенки полой заготовки перед протяжкой так, чтобы обжатие по толщине стенки находилось в пределах 6...8 %. Это обеспечит более стабильный процесс калибрования, повысит износостойкость рабочего инструмента и качество получаемых деталей.

Далее определяются остальные необходимые геометрические параметры:

- наружный диаметр подпрессованной заготовки не подвергается деформации и будет вычисляться с учетом внутреннего диаметра и выбранной толщины стенки:

$$D_r = d_r + 2S; \quad (4.5)$$

- длину подпрессованной полой заготовки  $l_{II}$  определяют из равенства объемов подпрессованной и протянутой заготовок.

*Построение профиля детали после прошивки.*

Основные размеры гильзы с дном после прошивки определяются из следующих соотношений:

- толщина дна гильзы выбирается так, чтобы максимальная деформация по толщине дна не превышала 20...30 %, т.е.

$$h_{\Gamma} = (1,2...1,3)h_{\Delta}; \quad (4.6)$$

- наружный и внутренний диаметр гильзы равен наружному и внутреннему диаметру детали после подпрессовки;

- глубина утяжки заднего торца гильзы может быть приблизительно рассчитана по эмпирической зависимости

$$h_y = 0,4 \cdot D_0 \cdot U_{\Pi}, \quad (4.7)$$

где  $U_{\Pi}$  – относительное обжатие заготовки по диаметру при прошивке;

- наружный диаметр донной части  $D_{\Delta}^{\Gamma}$  на прошитой гильзе определяется из величины обжатия заготовки в пережиме валков:

$$D_{\Delta}^{\Gamma} = D_0(1 - U_{\Pi}), \quad (4.8)$$

где  $D_0$  – диаметр исходной заготовки;

$U_{\Pi}$  – обжатие заготовки в пережиме ( $U_{\Pi}=0,12...0,15$ ).

*Построение исходной заготовки.*

Диаметр исходной заготовки  $D_0$  принимают равным  $D_{\Gamma}-p$ , где  $p$  – «подъем» гильзы относительно заготовки, который зависит в основном от отношения диаметра к толщине стенки гильзы и абсолютных размеров заготовки. При прошивке в трехвалковом стане гильз с  $D/S=5,5...6,5$  значение  $p=0...1,5$ .

Принятое значение  $D_0$  округляют до ближайшего стандартного значения диаметра прутка по ГОСТ 2590-88. Затем по массе заготовки с учетом зацентровочного углубления диаметром  $d_3=0,2 \cdot D_0$  и глубиной  $l_3=0,25 \cdot D_0$  определяют ее длину  $L_0$ .

Чертежи заготовок, спроектированные по предложенной методике, являются основой для разработки технологического процесса, в котором отражают температурные режимы (температуру нагрева и его продолжительность, неравномерность температуры по сечению и длине), деформационно-скоростные режимы (обжатие, частоту вращения рабочих валков, угол подачи рабочих валков), режимы охлаждения заготовок после прокатки, перечень оборудования, технологического и измерительного инструмента.

#### 4.2.2 Проектирование технологического инструмента

Расчет и проектирование технологического инструмента для АЛВП целесообразно выполнять аналогично расчету заготовок по технологическим операциям против хода процесса.

##### *Инструмент калибровочного пресса.*

Технологическим инструментом калибровочного пресса являются протяжное кольцо, пуансон, матрица, контейнер и съемник.

Протяжное кольцо (рисунок 4.20) служит для калибрования наружной цилиндрической поверхности полой заготовки путем проталкивания заготовки пуансоном через внутреннее цилиндрическое отверстие кольца заданного размера. При протяжке через систему колец необходимо распределить максимальное суммарное обжатие по стенке заготовки. Экспериментально установлено, что максимальное обжатие при протяжке через одно кольцо не должно превышать 15%. С другой стороны, минимальное обжатие стенки в одном кольце не должно быть менее 7% для плотного прилегания металла к оправке. Частные обжатия должны распределяться по ниспадающему режиму от первого к последнему кольцу.

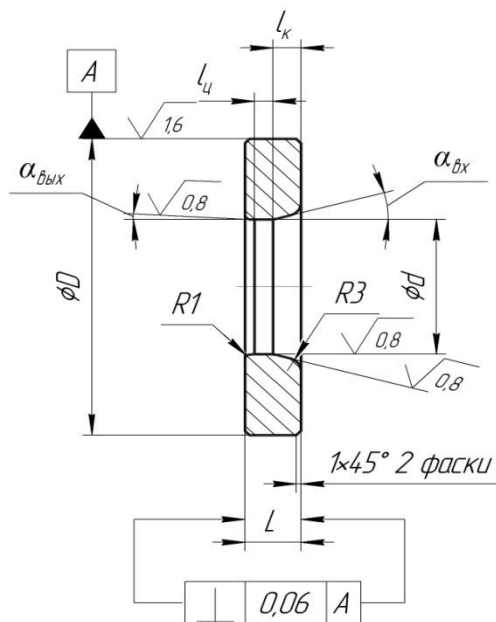


Рисунок 4.20 – Протяжное кольцо калибровочного пресса

Общая толщина кольца  $L$  складывается из калибрующего участка  $l_k$ , цилиндрического участка  $l_{ц}$ , и выходного участка  $l_v$ . Цилиндрический участок  $l_{ц}$  принимают длиной 8...10 мм. Увеличение этого значения будет вызывать увеличение потребных усилий для протяжки, а уменьшение может привести к быстрому износу колец [8, 20]. Угол входного конуса протяжного кольца  $\alpha_{вх}$  на практике назначается от 10 до 15°, приближаясь больше к верхнему пределу, так как по мере уменьшения этого угла увеличиваются силы трения на конической части кольца. Длина выходного участка  $l_v$  принимается не более 5 мм, а угол конусности  $\alpha_{вых}$  назначается в пределах 3...5°, что предотвращает образование задиров на поверхности кольца. Исходя из размеров выбранных участков  $l_v$ ,  $l_{ц}$  и общей длины  $L$ , которая задается конструктивно, определяется длина  $l_k$ .

Диаметр кольца  $d$  принимают соответственно диаметру корпуса с учетом припусков на механическую обработку и температурного расширения. Наружный диаметр  $D$  назначается конструктивно, но не менее  $d+20$  мм.

Протяжные кольца изготавливают из стали 4Х5МФС и термообработывают на твердость 40...44 HRC, рабочую поверхность после термообработки шлифуют.

В матрице выполняется оформление наружной поверхности донной части полый заготовки (рисунок 4.21), поэтому ее размеры должны соответствовать размерам детали с учетом припусков на механическую обработку (см. п. 4.2.1) и температурного расширения. Температура донной части заготовки после подпрессовки 950...970 °С.

Матрицу изготавливают из стали 4Х5МФС и термообработывают на твердость 40...44 HRC, внутреннюю поверхность после термообработки шлифуют.

Контейнер предназначен для направления заготовки при ее транспортировании в матрицу, его длину определяют исходя из конструкции блока матрицы, а диаметр выбирают равным  $D_z+(5...10)$  мм в зависимости от диаметра получаемых заготовок. Материал контейнера – сталь марок 40, 45, которую термообработывают на твердость 37...40 HRC. После термообработки посадочные поверхности у контейнера шлифуют.

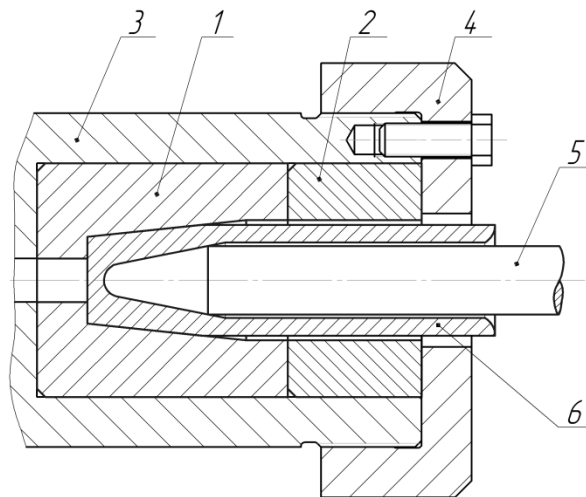


Рисунок 4.21 – Технологический инструмент для калибрования донной части полых заготовок:

1 – матрица; 2 – контейнер; 3 – корпус; 4 – прижимная гайка; 5 – пуансон; 6 – заготовка

Пуансон предназначен для оформления внутренней поверхности донной части полый заготовки. Обычно он имеет форму усеченного конуса с торцевой сферической поверхностью, соответствующей донной части корпуса. Длина головки пуансона должна быть не менее длины придонного конуса каморы, диаметр цилиндрического участка пуансона назначают равным  $D_z - (1 \dots 2)$  мм для свободной задачи во внутреннюю полость перед началом подпрессовки.

Пуансон изготавливают из стали 4X5МФС и термообработывают на твердость 40...44 HRC, после термообработки рабочую и посадочные поверхности шлифуют.

Съемник (рисунок 2.22) служит для извлечения пуансона из внутренней каморы полый заготовки после протяжки. Его изготавливают в виде пластины с вырезом.

Радиус прорези  $R$  выбирается по радиусу пуансона с учетом технологического зазора 0,5...1 мм. Для свободного охвата пуансона, расстояние  $l$  на краю прорези делают на 3...5 мм больше, чем  $R$ . С наружной стороны также выполняют фаски под углом  $\alpha$ . Высота съемника  $H$  выбирается исходя из конструкции пресса и необходимой величины хода.

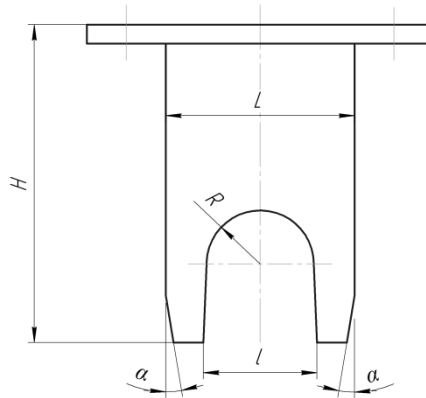


Рисунок 4.22 – Съемник калибровочного пресса

Материал съемника – сталь 4Х5МФС с твердостью наружной поверхности HRC 40...44 HRC.

*Инструмент прошивного стана.*

Технологическим инструментом трехвалкового прошивного стана являются рабочие валки и оправка. Рабочие валки осуществляют формоизменение заготовки в очаге деформации; потребляемая для формоизменения энергия передается от главного привода в очаг деформации через контактные поверхности металла с валками, поэтому необходимо стремиться к высоким значениям коэффициента трения на контакте «металл–валок» [20]. Рабочие валки изготовлены из стали 35ХМ с твердостью рабочей поверхности 220...260 НВ. Для повышения коэффициента трения на входной участок валков нанесена накатка глубиной 0,3 мм.

Диаметр валков  $D$  (рисунок 4.23) определяют, исходя из возможности их сближения при прокатке заготовок минимального диаметра:

$$(R + r_k) \cdot \cos 30^\circ = R + 0,5\Delta, \quad (4.9)$$

где  $R$  – радиус валка;  $r_k = \frac{d_3(1-U_n)}{2}$  – радиус минимального калибра;  $\Delta = 1...2$  мм – зазор между валками.

После преобразований

$$D \leq 6,5d_k - 7,5\Delta. \quad (4.10)$$

Длина бочки валков выбирается исходя из ориентировочного равенства

$$L_{\text{б}} = (0,8...1,2)D. \quad (4.11)$$

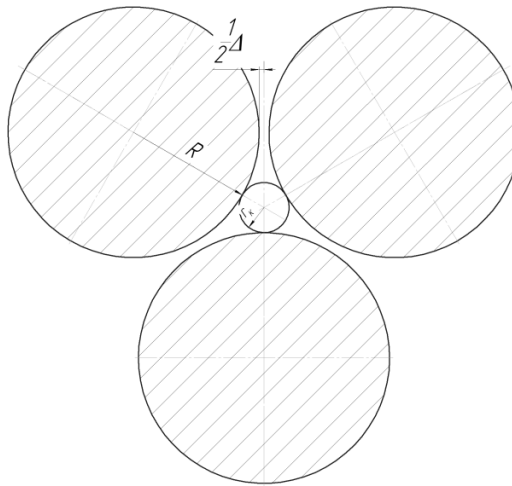


Рисунок 4.23 – К определению диаметра рабочего валка трехвалкового стана

Профиль валка (рисунок 4.24) состоит из трех основных участков: входного конуса, центрирующего участка и выходного конуса. Входной конус выполняют с углом наклона образующей к оси прокатки  $\varphi_1 = 3 \dots 6^\circ$  протяженностью

$$l > \frac{0,5 \cdot U_n \cdot d_3}{\operatorname{tg} \varphi_1}, \quad (4.12)$$

где  $U_n$  – обжатие заготовки по диаметру в пережиме валков;  $d_3$  – диаметр заготовки.

Центрирующий участок имеет угол  $\varphi = 0^\circ$  и длину  $l_c = (1,1 \dots 1,4) \cdot d_3$ , что обеспечивает центрирование заготовки в очаге деформации и достаточный запас тянущих сил для вторичного захвата заготовки.

Выходной конус выполняют с углом наклона образующей к оси прокатки  $\varphi_2 > \varphi_{\text{опр}}$  ( $\varphi_{\text{опр}}$  – угол наклона образующей раскатного участка оправки). Длина выходного конуса обычно составляет  $(0,3 \dots 0,5) \cdot L_6$ .

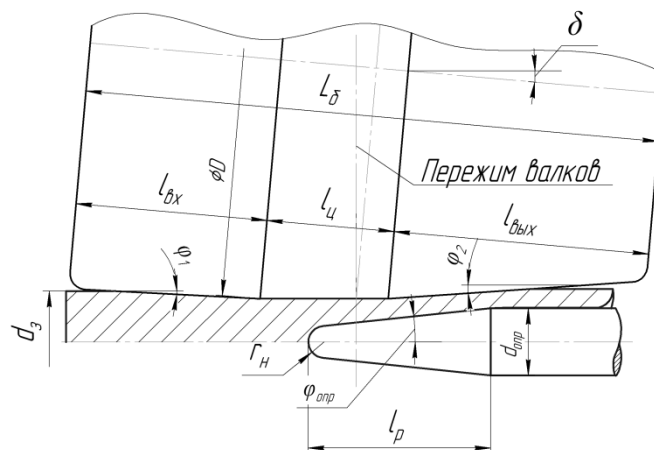


Рисунок 4.24 – Калибровка рабочего валка и оправки прошивного стана

Оправка служит для формирования полости в заготовке и состоит из носка, рабочего конусного участка и цилиндрического пояса. При прошивке заготовок в гильзы для корпусов полых изделий носок оправки выполняют сферическим с радиусом  $r_n$ , максимально приближенным к радиусу сферической поверхности пуансона, но не более  $0,65 \cdot r_o$ , где  $r_o$  – радиус оправки ( $0,5 \cdot d_{\text{опр}}$ ).

Угол наклона образующей рабочего участка оправки  $\varphi_{\text{опр}}$  может быть выбран в диапазоне  $2 \dots 8^\circ$ . Протяженность рабочего конического участка  $l_p$  определяется из соотношения

$$l_p = \frac{(r_o - r_n)}{\text{tg} \varphi_{\text{опр}}}. \quad (4.13)$$

Оправки изготавливают из стали 4X5МФС, термообработывают на твердость HRC 40...44 HRC, сохраняя слой окислов после термообработки. Для повышения износостойкости рабочее тело оправки может быть выполнено из жаропрочного сплава ЭИ-131, ЭП-567 или ЭК-31.

Таким образом, разработана методика проектирования технологического процесса получения полых заготовок с дном диаметром 30...60 мм с использованием компьютерного моделирования в программном комплексе Deform 3D основных операций: нагрева, винтовой прошивки, подпрессовки донной части и протяжки полрой заготовки на пуансоне через кольца. Полученные результаты хорошо коррелируются с экспериментальными данными, зафиксированными при получении заготовок диаметром 30 мм на АЛВП.



## Выводы

1. Разработана технология производства полых заготовок с дном малого диаметра, которая основана на сочетании горячей прошивки в трехвалковом стане винтовой прокатки и последующего калибрования на механическом прессе. Разработанная технология обеспечивает получение с одного нагрева полых заготовок массой 0,5...2,5 кг диаметром 30...60 мм в автоматизированном режиме.

2. На основании выявленных закономерностей изменения температурных полей заготовок малого диаметра и деформационных условий горячей прошивки и транспортно-передаточных операций разработаны операционные графики работы быстродействующей автоматизированной линии. Время передачи заготовки от нагревательной установки до прошивного стана составляет не более 2 с; время всего цикла – 20...30 с.

3. Разработаны технологические режимы процессов горячей прошивки в трехвалковом стане винтовой прокатки и калибрования на механическом прессе. Установлено, что процесс прошивки на оправке, приближенной к форме внутренней полости детали, протекает стабильно при обжатии заготовки по диаметру 12...14 %, при этом обжатие перед носком оправки также составляет 12...14 %. При калибровании полый заготовки на прессе протяжкой через кольцо обжатие по толщине стенки должно быть в пределах 6...8 %.

4. Выполнены расчеты и разработана специальная конструкция быстродействующего оборудования трехвалкового стана винтовой прокатки и механического прессы со встроенными транспортно-передающими устройствами. Рабочая клеть прошивного стана выполнена со станиной закрытого типа, имеющей коэффициент жесткости калибра 2,14 МН/мм. Выходная сторона рычажного типа позволяет получать полые заготовки с отклонением по толщине дна до 2 мм. Механический пресс выполнен трехколонным с поворотной плитой с контейнерами для калибрования донной части и протяжки. Оборудование автоматизированной линии винтовой прокатки обладает высокой

производительностью (до 200 шт./час) и обеспечивает получение высокоточных полых заготовок с дном (разностенность не превышает 7 %).

5. Разработана методика расчета размеров исходной заготовки и полуфабрикатов, обеспечивающая коэффициент использования металла на уровне 0,5...0,75. На основании анализа результатов исследования образования обезуглероженного слоя при нагреве заготовки и в процессе формоизменения установлено, что припуск на механическую обработку наружной поверхности должен быть не менее 0,17 мм.

Разработанные технология и оборудование запатентованы и внедрены на предприятии АО «НПО «Прибор» в г. Ногинск.

### Список использованной литературы

1. Целиков, А.И. Специальные прокатные станы / А.И. Целиков, М.В. Барбарич, М.В. Васильчиков и др. - Металлургия, 1971.
2. Васильчиков, М.В. Производство точных заготовок машиностроительных деталей прокаткой / М.В. Васильчиков. – М.: НИИИформтяжмаш, 1968.
3. Грановский, С.П. Новые процессы и станы для прокатки изделий в винтовых калибрах / С.П. Грановский. - М.: Металлургия, 1980. - 116 с.
4. Кирпичников, Ф.П. Производство точных заготовок машиностроительных деталей прокаткой / Ф.П. Кирпичников. – М.: НИИИформтяжмаш, 1968. - 158 с.
5. Целиков, Н.А. Изготовление стальных шаров холодной прокаткой в винтовых калибрах. / Н.А. Целиков // Вестник машиностроения. 1984. №4. - С. 41-43.
6. Котенок, В.И. Аналитическое исследование процесса прокатки шаров в винтовых калибрах / Н.А. Целиков, В.И. Котенок // Сборник научных трудов ВНИИМЕТМАШ. Совершенствование технологии, конструкций и расчетов металлургических машин. Москва. - 1986. - С. 38-51.
7. Кодрон, К. Горячая обработка давлением. Производственные процессы горячей обработки металлов, т. 3 / К. Кодрон. – М.: Московское научное издательство «МАКИЗ», 1929. – 383 с.
8. Рыбарж, А.А. Производство снарядов. / А.А. Рыбарж. – НКАП СССР. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1943.
9. Материалы фирмы «Mannesmann Demag Huttentechnik», ФРГ, 1992.
10. Скоробогатская Л. Н., Шумилин В. К., Левшунов М. А. Повышение качества подшипниковых труб и эффективности их производства. – Черная металлургия. – 1986.
11. Разностенность гильз при прошивке на вертикальных гидравлических прошивных прессах / А. Е. Притоманов, Б. В. Мандзюк, О. А. Овсенок и др. – М.: Металлургия. – 1987.
12. Вердеревский В. А., Глейберг А. З., Никитин А. С. Трубопрокатные станы. – М.: Металлургия. – 1983. – 240 с.

13. Анализ причин возникновения и методы устранения разностенности прессованных трубных заготовок / А. А. Нагайцев, П. М. Грабарник, А. В. Макаров и др. – Цветные металлы. – 1989.
14. Предупреждение разностенности гильз, получаемых методом прессвалковой прошивки. Yoshiwaka Seishiko, Kawakaki Takao. – 1985.
15. Серебrenицкий П. П. Краткий справочник станочника. – Л.: Лениздат, 1982. – 358 с.
16. Попов А.Ю., Макашин Д.С. Повышение точности обработки сверлением за счет определения рациональной длины крепления инструмента, депонированная рукопись № 461-B2011, 2011.
17. Пальчиков Р.И. Повышение стойкости сверл малого диаметра для глубокого сверления. «Поколение будущего: взгляд молодых ученых», сборник научных статей 4-й международной молодежной научной конференции: в 3 томах, 2016.
18. Sharman A.R.C., Amarasinghe A., Ridgway K. Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718, Journal of materials processing technology 200 (2008), 424-432.
19. Krolczyk G.M., Nieslony P., Legutko S. Determination of tool life and research wear during duplex stainless steel turning, Archives of civil and mechanical engineering 15 (2015), 347-354.
20. Б. А. Романцев, И. Н. Потапов, А. В. Гончарук, В. А. Попов Изготовление полых профилированных заготовок. – М.: НПО «Информ ТЭИ». – 1992. – 263 с.
21. Б. А. Романцев, А. В. Гончарук, Н. М. Вавилкин, С. В. Самусев. Обработка металлов давлением: Учебник. – М.: Изд. Дом МИСиС. – 2008. – 960 с.
22. Кущинский Г.Н. Исследование точности бесшовных труб и разработка мероприятий для ее повышения на косовалковых станах. Автореферат кандидатской диссертации. Днепропетровск, 1972 г.
23. Исследование разностенности гильз при крской прокатке. / В.Я. Остренко, Ю.М. Миронов, В.И. Ермолов, Л.А. Чиж. - Сталь, № 8, с. 728-732, 1970 г.

24. Точность толстостенных гильз при прошивке на трехвалковом стане /И.Н. Потапов, В.И. Шаманаев, Б.А. Романцев и др. Известия вузов.ЧМ, 1975, №5, с. 84-88.
25. Слесарев О. В. Разработка технологии получения точных толстостенных полых заготовок ответственного назначения. Автореф. Дисс. Канд. техн. наук. – М. – 1986.
26. Коздоба Л. А., Круковский П. Г. Методы решения обратных задач теплопереноса. – Киев: Наукова думка. – 1982. – 360 с.
27. Данилушкин А.И., Никитина Е.А. Система управления процессом энергоэффективного индукционного нагрева цилиндрической заготовки. Южно-сибирский научный вестник, 2012, №1, с. 27-30.
28. Jang, J.-Y., Chiu, Y.-W. Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro-magnetic induction heating, Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 70101, Taiwan, Received 27 May 2006; accepted 30 December 2006, Available online 26 January 2007.
29. Бровкин Л. А. Температурные поля пил при нагреве и плавлении в промышленных печах. – Ивановский политехнический институт / Учебное пособие. – 1973. – 364 с.
30. Коздоба Л. А. Решение нелинейных задач теплопроводности. – Киев: Наукова думка. – 1976. – 136 с.
31. Ваткин Я.Л., Клейнер М.К., Эммануэль Г.А. Влияние несимметричности нагрева заготовок на разностенность горячекатаных подшипниковых труб. // Сталь, № 6, 1972 г., с.537-541.
32. Яловой Н. И., Тылкин М. Л., Полухин П. И. и др. Тепловые процессы при обработке металлов давлением. – М.: Высшая школа. – 1973. – 361 с.
33. Математическая модель температурных условий охлаждения металла при пластической деформации / А. М. Кушнир, Е. И. Казанцев / Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1985.

34. Данилов, Ф.А. Адаптивное управление точностью прокатки труб / Данилов Ф.А., Имерадзе В.В., Клемперт Е.Д., Лоц Ю.Б., Миронов Ю.Г. и др. – М.: Металлургия, 1980. – 380 с.
35. Столетний М.Ф., Клемперт Е.Д. Точность труб., М., Металлургия 1975 г., 240 с.
36. Потапов И.Н., Попов В.А., Романцев Б.А. и др. «Пластическая деформация металлов и сплавов» М.: Металлургия, 1975 (МИСиС Сб. №85), с. 105-109.
37. Разностенность гильз при прошивке на трехвалковом стане / И. Н.Потапов, Е.С. Бондаренко, П.М. Финагин и др. Бюлл. ЦНИИЧМ, 1974, №6, с. 42-46.
38. Точность толстостенных гильз при прошивке на трехвалковом стане /И.Н. Потапов, В.И. Шаманаев, Б.А. Романцев и др. Известия вузов.ЧМ, 1975, №5, с. 84-88.
39. Потапов И.Н., Попов В.А., Романцев Б.А. Исследование разностенности передних концов гильз // Труды МИСиС. – 1976, №9. – С. 65-68.
40. Жолобов В. В., Зверев Г. И. Инструмент для горячего прессования металлов. – Москва, Ленинград: Машиностроение, 1965. – 163 с.
41. Балакин, В.Ф. Экспериментальные исследования различных вариантов химической обработки поверхности при холодной пилигримовой прокатке углеродистых труб на стане ХПТ-90 / В.Ф. Балакин, Д.Ю. Гармашев, А.Ю. Салей, Т.Н. Невилько // Мир металла. – октябрь 2015.
42. Киффер, Ж.-М. Современные технологические смазки для процессов горячей деформации в производстве бесшовных труб / Ж.-М. Киффер // Сталь, №11. – 2011.
43. Романцев, Б.А. Особенности износа рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426 при прокатке непрерывнолитых заготовок большого диаметра / Б.А. Романцев, А.С. Алещенко, В.Ю. Цюцюра, И.И. Лубе // Производство проката, №6. – 2016.
44. Гребеник В.М., Гордиенко А.В., Цапко В.К. Повышение надежности металлургического оборудования. – М.: Металлургия, 1988. – 688 с.

45. Амиров И.М. Штамповка на горизонтально-ковочных машинах. Изд.: Москва-Свердловск, 1963, 167 с.
46. Кокфорт, М.Г. Смазка и смазочные материалы: Смазка в процессах обработки металлов давлением: пер. с англ. М.: Metallurgiya, 1970. – 111 с.
47. Груднев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением / А.П. Груднев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. Справ. изд. – М.: Metallurgiya, 1982. – 312 с.
48. Давыдов, Ю.П. Технологические смазки для обработки металлов давлением / Ю.П. Давыдов. – М.: Машгиз, 1960. – 200 с.
49. Жолобов В. В., Зверев Г. И. Инструмент для горячего прессования металлов. – Москва, Ленинград: Машиностроение, 1965. – 163 с.
50. Патент № 2600594 РФ, МПК В21К21/06. Способ изготовления заготовок в форме стакана из прутка / Свободов А.Н., Чижевский О.Т., Липченко Ю.Н. и др. – заявл. 03.02.2015 г., опубл. 03.10.2016 г.
51. Электрооборудование прошивных и раскатных станов винтовой прокатки: Учеб. пособие / А.С. Михайлов, С.П. Галкин, И.И. Лубе и др. – Выкса: Выксунский филиал НИТУ «МИСиС», 2010.
52. Хензель, А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М.: Metallurgiya, 1982. 360 с.
53. Целиков А.И. Основы теории прокатки. – М.: Metallurgiya, 1965. 248 с.
54. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. М: Metallurgiya, 1990 г. 344 с.
55. Интенсификация поперечно-винтовой прокатки. / А.П. Чекмарев, Ю.М. Матвеев, В.Н. Выдрин, Я.С. Финкельштейн. – М.: Metallurgiya, 1970, 184 с. с ил.
56. Гончарук А.В., Стоппе Е.В., Осадчий В.А. Расчет таблиц и усилий прокатки. Учеб. пособие. – М.: Учеба, 2007.
57. Иванченко Ф.К., Полухин П.И., Тылкин М.А., Полухин В.П. Динамика и прочность прокатного оборудования. М.: Metallurgiya, 1970. 352 с.
58. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. Учебное пособие для вузов. М.: Metallurgiya, 1985. 376 с.
59. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. М.: Metallurgiya, 1958. 432 с.

60. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер.с англ. М.: Мир, 1975. 541 с.
61. «Mainstream CAE Tools: Technical Consideration and Informative Comparision». 2002 г.
62. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир. 1979. 392 с
63. Портал технической поддержки SWR-CRM. – URL: [http://www.solidworks.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=39&Itemid=76](http://www.solidworks.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=39&Itemid=76) (Дата обращения: 14.03.2016).
64. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Metallurgy, 1976. 488 с.
65. Скрипаленко М.М., Баженов В.Е., Романцев Б.А. и др. Компьютерное моделирование сквозных технологических процессов производства металлопродукции, Metallurg, №2, 2014, с. 39-43.
66. Pater Z., Kazanecki J., Bartnicki J. Three dimensional thermo-mechanical simulation of the tube forming process in Diescher's mill, Journal of materials processing technology 177 (2006), 167-170.
67. Wang F.-J., Shuang Y.-H., Hu J.-H. et al. Explorative study of tandem skew rolling process for producing seamless steel tubes, Journal of materials processing technology 214 (2014), 1597-1604.
68. Патент № 2056956 РФ, МПК В21В19/04. Трехвалковый калибр и способ его настройки / Гольдштейн И.Л., Терентьев Д.В., Финагин П.М. и др. – заявл. 28.07.1992 г.
69. Есаулов Г.А., Гольдштейн И.Л. Особенности геометрии станов винтовой прокатки, Metallurgicheskaya i gornodobyvayushchaya promyshlennost', 2000, с. 289-290.
70. Патент № 2596519 РФ, МПК В21В19/06. Способ винтовой прокатки полых заготовок с дном / Романцев Б.А., Гончарук А.В., Гамин Ю.В. и др. – заявл. 17.04.2015 г., опубл. 10.09.2016 г.
71. Романцев Б.А. Полые профилированные заготовки повышенной точности. Технология и конструкция машин: диссертация на соискание степени доктора



технических наук по специальности 05.16.05 – «Обработка металлов давлением».  
– Москва, 1993 г.

72. Смирнов А.В. Окисление и обезуглероживание стали / А.В. Смирнов, Л.В. Белоручев. – ОНТИ: Metallurgizdat, 1937. 224 с.