

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.С. ТУРГЕНЕВА»

На правах рукописи



НИЗМЕЕВ Александр Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ РАДИАЛЬНОГО
ОБЖАТИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЗАГОТОВОК В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Специальность 2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук,
доцент Дорохов Даниил Олегович

Орел – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1 Технические требования, предъявляемые к обжимному инструменту	19
1.2 Характеристика геометрических элементов бойков, влияющих на процесс радиального обжатия	25
1.3 Известные методы повышения стойкости и улучшения конструкций обжимных бойков	35
1.4 Выводы по главе 1	49
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАДИАЛЬНОГО ОБЖАТИЯ	51
2.1 Физическая модель процесса радиального обжатия	51
2.2 Выбор рациональной формы заходного участка обжимных бойков	56
2.3 Исследование процесса радиального обжатия по стадиям деформирования	66
2.4 Анализ базовой методики расчета энергосиловых параметров холодного радиального обжатия	74
2.5 Методика расчета энергосиловых параметров холодного радиального обжатия по стадиям деформирования	78
2.6 Выводы по главе 2	86
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАДИАЛЬНОГО ОБЖАТИЯ	88
3.1 Методика проведения экспериментальных исследований	88
3.2 Статистическая обработка полученных результатов	94
3.3 Выводы по главе 3	106
4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	108
4.1 Анализ базовой технологии получения заготовки	108
4.2 Конструкция бойков базового исполнения	111
4.3 Проектирование бойков с переменным углом заходного конуса	114
4.4 Расчет энергосиловых параметров радиального обжатия бойками с переменным углом заходного конуса	121
4.5 Технико-экономическая оценка	126
4.6 Выводы по главе 4	128
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	133

ПРИЛОЖЕНИЯ	145
Приложение А. Результаты эксперимента	145
Приложение Б. Расчет энергосиловых параметров радиального обжата бойками различного профиля	151
Приложение В. Акт о внедрении результатов диссертационной работы	167
Приложение Г. Чертеж бойка с гиперболическим профилем заходного конуса	168

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Валы и оси с небольшими перепадами диаметров ступеней получили широкое распространение в электротехнике, авиастроении, транспортном и сельскохозяйственном машиностроении. Традиционные способы получения заготовок таких деталей в серийном производстве, такие как штамповка на горизонтально-ковочных машинах и на кривошипных горячештамповочных прессах требуют расходов на изготовление специальной технологической оснастки, поэтому их применение экономически целесообразно только при больших программах выпуска. Применение штучных заготовок из проката характеризуется низкой производительностью и большими припусками на механическую обработку.

Среди перспективных способов обработки металлов давлением для производства заготовок подобных изделий следует выделить радиальное обжатие, применение которого позволяет уменьшить, а иногда и вовсе исключить последующий объем механической обработки. Основная область применения – изготовление точных осесимметричных заготовок ступенчатых валов, осей и втулок для нужд машиностроения.

Выполненный аналитический обзор публикаций, посвященный обжимному инструменту, показал, что авторами уделяется недостаточное внимание совершенствованию обжимного инструмента и влиянию профиля рабочей части на энергосиловые параметры радиального обжатия. В настоящее время отсутствует единая методика назначения геометрических элементов обжимных бойков для реализации технологического процесса обжатия с наибольшей эффективностью. Кроме того, применяемые методики расчета силы и мощности могут быть использованы только для определения энергосиловых параметров радиального обжатия бойками с неизменным (постоянным) углом заходного конуса. Использование современных металлорежущих станков с компьютеризированными устройствами числового программного управления (систем CNC и “CAM-систем”) открыло значительные перспективы

совершенствования технологии радиального обжатия путем применения современных конструкций обжимных бойков и разработке математических моделей радиального обжатия бойками с различной конфигурацией профиля заходного участка. Таким образом, выбранная тема исследований является актуальной и значимой для различных отраслей машиностроения.

Степень разработанности проблемы исследования. Вопросами технологии радиального обжатия и сходных процессов занимался ряд отечественных и зарубежных ученых, среди которых можно выделить Тимергалеева Р.М., Сапуткина Е.П., Макарова А.И., Тюрина В.А., Радюченко Ю.С., Троицкого В.П., Деордиева Н.Т., Поспелова И.А., Голенкова В.А., Унксова Е.П., Павлова И.М., Любвина В.И., Могильного Н.И., Радченко С.Ю., Бородин Н.М., Рудакова Б.П., Степанова Е.В., Новикова В.М., Мошнина Е.Н., Филимонова Ю.Ф., Kalpakcioglu S., Packham C.L., Yang D.Z., Zhang B.Y., Cui Y.X., Shao W.Z. и многих других ученых.

Значительное внимание проектированию обжимных бойков уделили такие ученые как Тимергалеев Р.М., Сапуткин Е.П., Макаров А.И., Тюрин В.А., Радюченко Ю.С., Троицкий В.П., Деордиев Н.Т., Трофимов И.Г., Боев В.Л., Меркулов А.М.

Несмотря на достаточно широкую проработку в литературе указанной темы в настоящее время отсутствуют единые рекомендации и методика выбора геометрических элементов обжимных бойков.

Цель работы: повышение эффективности технологии радиального обжатия и качества изделий путем сокращения энергозатрат процесса за счет оптимизации формы заходного участка деформирующего инструмента.

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

1. Выполнить анализ существующих разработок в области конструктивных элементов радиально-обжимных бойков, определить влияние геометрических элементов на показатели процесса радиального обжатия.

2. Провести теоретическое исследование радиального обжатия, предложить

математическую модель процесса и на основе ее анализа:

- разработать методику расчета энергосиловых параметров при деформировании бойками с различной геометрией заходного конуса;
- установить влияние угла заходного конуса бойка на энергосиловые параметры процесса обжатия.

3. Выполнить экспериментальные исследования, направленные на проверку полученных результатов математического моделирования и оценки эффективности применения бойков с переменным углом заходного конуса.

4. Разработать практические рекомендации по повышению эффективности технологий радиального обжатия путем применения бойков с переменным углом заходного конуса.

Объект исследования: процесс холодного радиального обжатия сплошных цилиндрических заготовок, используемых в машиностроении.

Предмет исследования: влияние геометрии заходного участка обжимных бойков на энергосиловые параметры процесса радиального обжатия и качество получаемых изделий.

Методы исследования. Теоретические исследования в диссертационной работе базируются на основных положениях теории обработки металлов давлением, основных законах пластической деформации и научных работах ученых по вопросам радиального обжатия заготовок из различных материалов. Основой для разработки математической модели является численное интегрирование по методу наименьших квадратов, с помощью которого выражена математическая зависимость угла заходного конуса бойка от диаметра обжимаемой заготовки.

Эксперимент осуществлялся в лабораторных условиях. При выполнении экспериментальной части исследований использовался метод критериев подобия, а при обработке результатов эксперимента использовались известные методы математической статистики. Обработка данных моделирования и результатов эксперимента производилась с помощью программ статистического и математического анализа. Проверка воспроизводимости эксперимента

подтверждается критерием Кохрена, а адекватность математического описания экспериментальных данных – критерием Фишера.

Обоснованность и достоверность результатов исследований обеспечивается применением современных методов теоретических исследований и анализа, большим объемом лабораторных и опытно-промышленных экспериментов, выполненных по общепризнанным методикам; достаточной сходимостью результатов аналитических решений с результатами лабораторных исследований, использованием методов математической статистики.

Автор защищает:

1. Результаты теоретических исследований радиального обжатия, которые позволили выявить закономерности изменения энергосиловых параметров по стадиям процесса.

2. Методику расчета энергосиловых параметров радиального обжатия бойками с переменным углом заходного конуса, в которой учитывается изменение угла заходного конуса бойка и предела текучести обрабатываемого материала.

3. Результаты экспериментов по обжатию цилиндрических заготовок бойками с различным профилем заходного участка.

4. Пути совершенствования технологии радиального обжатия путем применения бойков с переменным углом заходного конуса.

5. Результаты применения бойков с переменным углом заходного конуса гиперболического профиля для производства поковки вала колонки в условиях действующего производства.

Научная новизна исследования:

1. Разработана и исследована математическая модель холодного радиального обжатия сплошных цилиндрических заготовок с помощью пошагового интегрирования по методу наименьших квадратов, численно учитывающая изменение угла заходного конуса бойка и предела текучести обрабатываемого материала по стадиям деформирования. На основе анализа математической модели:

– установлена закономерность изменения контактных и энергосиловых параметров радиального обжатия по стадиям процесса, при этом в основной стадии наблюдается установившийся характер деформирования, который характеризуется постоянством длины контакта заготовки с рабочей частью инструмента, объемом обжимаемого металла и равномерным нагружением заходного конуса бойка;

– установлено, что при увеличении угла заходного конуса бойка снижается сила деформирования до 42%, мощность – до 31,6% в зависимости от профиля заходного участка за счет сокращения площади контакта заходного участка бойка с поверхностью заготовки и максимального переноса работы формоизменения в основную стадию с установившимся процессом.

2. На основе результатов моделирования:

– научно обоснована методика расчета энергосиловых параметров радиального обжатия бойками с переменными углами заходного конуса;

– доказано, что применение бойков с переменным углом заходного конуса, имеющих выпуклый профиль, позволяет снизить требуемую силу деформирования до 42%, мощность – до 31,6% в зависимости от формы заходного участка по сравнению с бойками базового исполнения, имеющие постоянный угол заходного конуса.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается корректным использованием математического аппарата, согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований, апробацией результатов на практике и внедрением результатов в производство.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

1. Результаты теоретических исследований радиального обжатия позволили:

– разработать методику расчета энергосиловых параметров, которая позволяет рассчитать параметры процесса при деформировании бойками с любой геометрией заходного участка;

– доказать эффективность применения бойков с переменным углом заходного конуса при деформировании сплошных цилиндрических заготовок.

2. Разработаны практические рекомендации по совершенствованию технологии радиального обжата при получении сплошных цилиндрических заготовок, реализация которых позволила:

- повысить эффективность радиального обжата за счет снижения расходов электроэнергии до 33% на самых энергозатратных переходах деформирования заготовки вала;

- использовать результаты на действующем предприятии АО «Навлинский завод «Промсвязь» для производства заготовки детали «Вал колонки» и получить снижение себестоимости заготовки на 5,67% по сравнению с обжатием бойками базового исполнения с постоянным углом заходного конуса.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации доложены и одобрены на следующих научных конференциях: Международная научно-техническая конференция «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем» (г. Севастополь, 2025 г.); VIII международная заочная научная конференция «Форум молодых ученых: мир без границ», приуроченная ко Дню народного единства (г. Донецк, 2021 г.); VI международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (г. Алчевск, 2021 г.); VIII заочная всероссийская научно-практическая конференция с международным участием имени академика А.Г. Шипунова (г. Ливны, 2021 г.); II международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых» (г. Алчевск, 2021 г.); IV международная научно-практическая конференция «Материаловедение XXI века» (г. Луганск, 2021 г.); VI международная заочная научная конференция «Форум молодых ученых: мир без границ», приуроченная ко Дню народного единства (г. Донецк, 2020 г.); V международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (г. Алчевск, 2020 г.); Всероссийская научно-практическая конференция для аспирантов, студентов и молодых ученых «Современные технологии: проблемы и перспективы»

(г. Севастополь, 2020 г.); Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых» (г. Алчевск, 2020 г.); IV международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (г. Алчевск, 2019 г.).

Публикации. Материалы проведенных исследований отражены в 20 работах, из которых 4 статьи опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 8 статей в научных журналах, 8 докладов на научных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 105 источников, четырех приложений и включает 171 страницу машинописного текста, содержит 57 рисунков, 16 таблиц.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальной задачей современной промышленности является разработка новых и совершенствование существующих технологий с целью снижения ресурсозатрат и получения максимальной прибыли в условиях рыночной экономики.

Обработка металлов давлением широко используется в производстве благодаря возможности изготовления широкой номенклатуры выпускаемых изделий, а также высокой степени механизации и автоматизации процесса. Радиальное обжатие является одним из перспективных способов обработки металлов давлением [1-5].

Радиальное обжатие представляет собой способ деформирования, при котором заготовка вращается и перемещается в осевом направлении в зону обработки, где подвергается циклическим ударным нагрузкам бойками, совершающих движение по радиусу от периферии к центру и обратно. В результате уменьшается площадь поперечного сечения и увеличивается длина исходной заготовки. Принципиальная схема процесса представлена на рисунке 1.1.

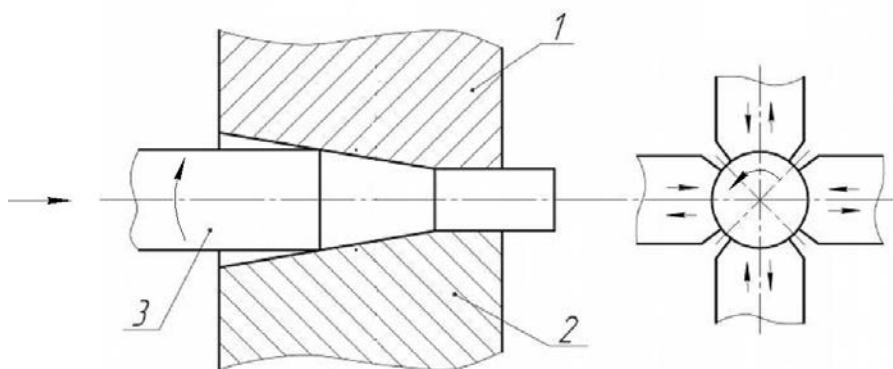


Рисунок 1.1 – Схема процесса радиального обжатия [3]: 1, 2 – бойки; 3 – заготовка

Такой способ позволяет обрабатывать заготовки из малопластичных и жаропрочных сплавов осесимметричного сечения со сложной конфигурацией внутренней поверхности, детали с отверстиями малых диаметров на большой

длине, выполнять некоторые сборочные операции, а именно: запрессовка пружин во втулках, посадки ниппелей и втулок с натягом, соединение тросов обжатой муфтой и т.д. Радиальное обжатие характеризуется высокой производительностью и точностью изготовления заготовок [2-4].

Производительность обработки достигается за счет согласованного вращательного и относительного поступательного перемещения заготовки и инструмента. Процесс радиального обжатия характеризуется циклическим нагружением и сводится к пластическому изменению формы заготовки путем пошагового перемещения элементарных объемов металла вдоль очага деформации [10].

Во многих работах радиальное обжатие часто называют радиальной ковкой [4-8]. Главное отличие радиального обжатия от ротационного заключается в применяемом оборудовании, которое различается характером движения рабочих и приводных узлов. Принцип действия и кинематика радиально-обжимных машин подобны принципу действия кривошипных кузнечно-прессовых машин. В таком оборудовании ни бойки, ни обжимной механизм не вращаются вокруг оси подачи заготовки. А в ротационно-обжимных машинах наоборот — шпиндель с обжимным механизмом, представляющим собой обойму с роликами, совершают вращательное движение вокруг обрабатываемой заготовки, а бойки возвращаются в исходное положение под действием центробежных сил (рисунок 1.2).

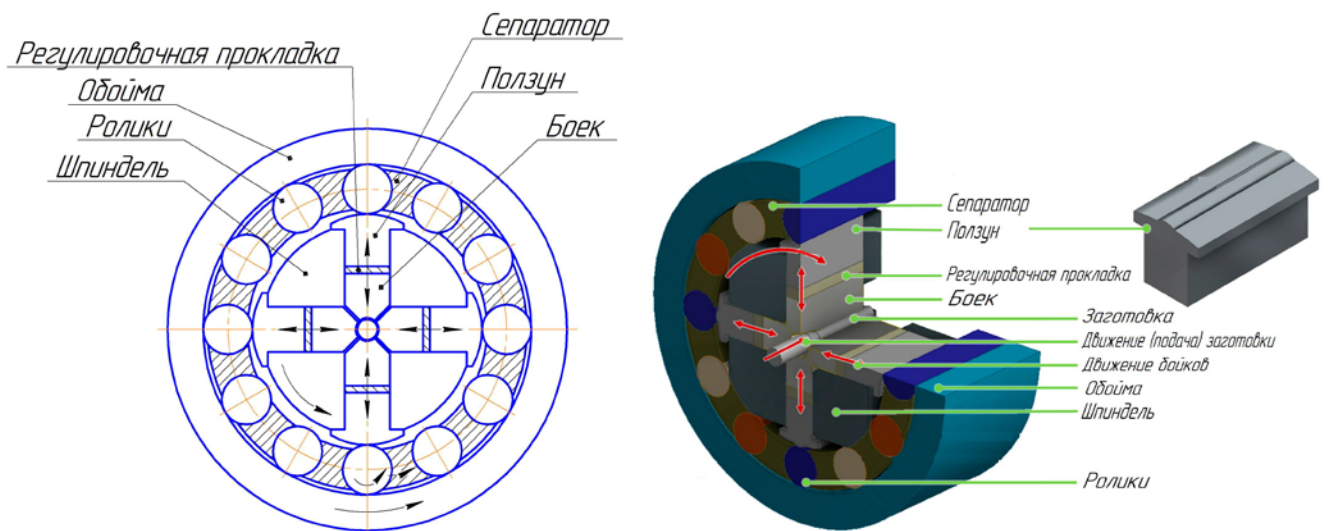


Рисунок 1.2 – Схема процесса ротационного обжатия [2]

Цилиндрические заготовки небольших размеров (диаметром до 40 мм) экономически выгоднее обрабатывать на ротационно-обжимных машинах, стоимость которых ниже по сравнению с аналогичными радиально-обжимными машинами. Однако лучшая чистота поверхности достигается на двухбойковых машинах, так как с ростом числа бойков уменьшается площадь контакта заготовки с инструментом [1-2].

В настоящее время оборудование для радиального обжатия представлено широким спектром машин, различающихся конструктивным исполнением и технологическими возможностями. Схема классификации оборудования для обжатия представлена на рисунке 1.3.

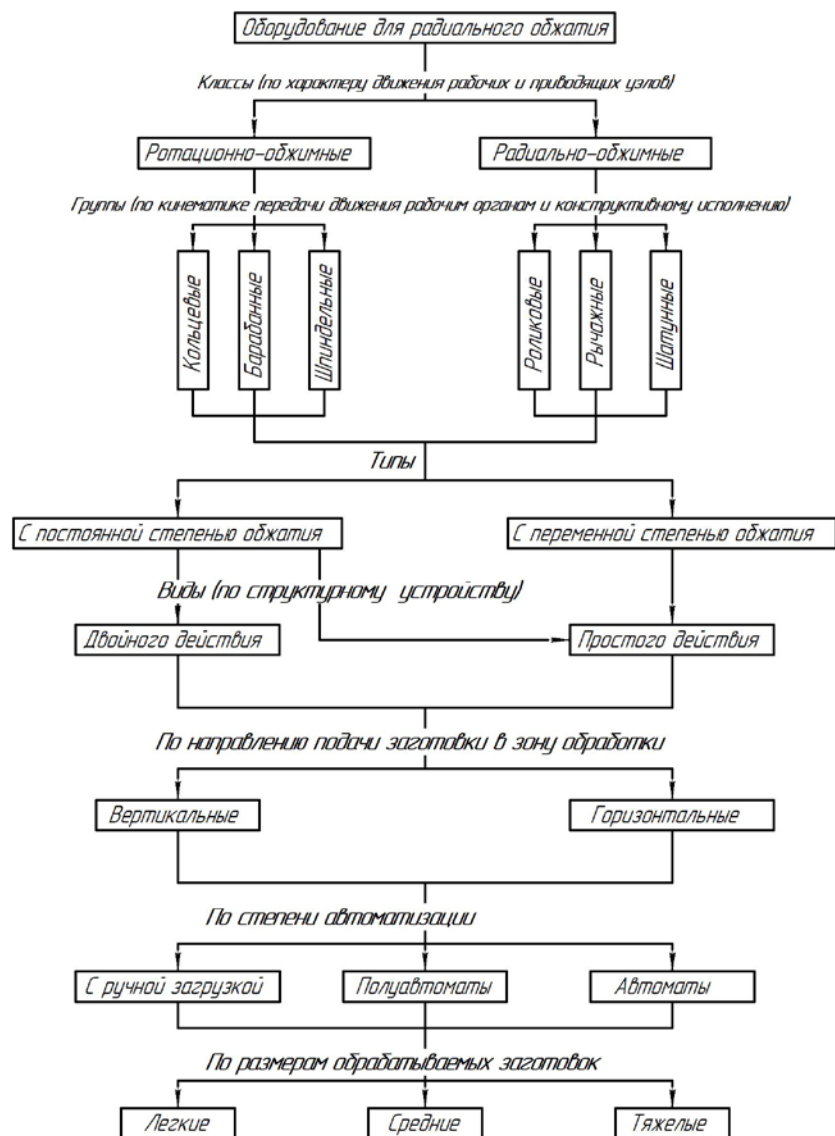


Рисунок 1.3 – Классификация оборудования для радиального и ротационного обжатия

Разделение оборудования внутри классов основана на кинематике передачи движения рабочим органам и их конструктивному исполнению. Движение от привода к бойкам передается обжимными механизмами, работающими по принципу кривошипно-шатунного и коленно-рычажного механизмов. Существует два способа радиального обжатия: раздельное и профильное [1, 2, 5, 50]. Схемы раздельного и профильного обжатия приведены на рисунке 1.4.

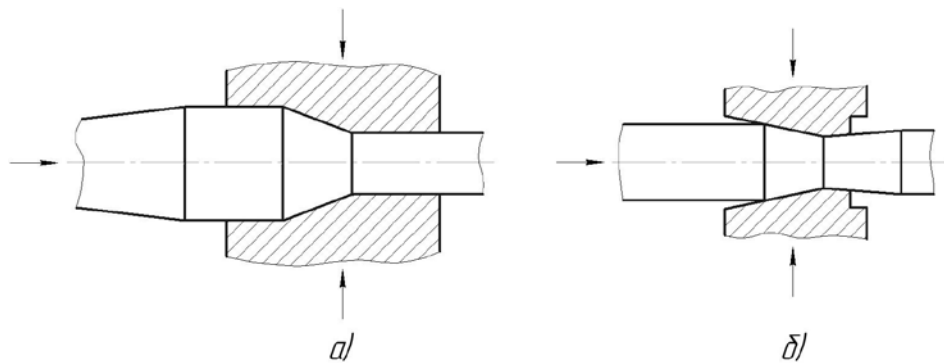


Рисунок 1.4 – Схемы формообразования при радиальном обжатии:

а) раздельное; б) профильное

При раздельном обжатии форма и точность поковок выдерживаются конфигурацией и размерами ручья бойков в закрытом состоянии. В процессе же профильного обжатия обеспечение точности достигается путем изменения закрытой высоты между бойками и шага подачи в процессе деформирования. Точность линейных размеров в обоих случаях выдерживается с помощью упоров, которые ограничивают ход подающего устройства. Основные характеристики способов обжатия приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристика раздельного и профильного обжатия

<i>Параметр</i>	<i>Тип обжатия</i>	
	<i>Раздельное</i>	<i>Профильное</i>
Величина хода бойков	постоянная	регулируемая
Величина хода подачи заготовки	постоянная	регулируемая

При раздельном и профильном обжатии существуют различные способы обработки, а именно [1]:

- 1) формообразование вращающимся и радиально перемещающимся инструментом (шпиндельные и барабанные ротационно-обжимные машины);
- 2) обжатие только радиально перемещающимся инструментом (радиально-обжимные и кольцевые ротационно-обжимные машины);
- 3) деформирование качающимся и радиально-перемещающимся инструментом (некоторые конструкции радиально- и ротационно-обжимных машин).

Перечисленные способы деформирования определяются такими факторами как кинематика обжимного механизма и характер перемещения заготовки в рабочей зоне, который дополняет особенности указанных способов обработки. Движение заготовки в рабочей зоне может быть поступательным вдоль оси, вращательным, сочетанием вращательного и поступательного движений или заготовка может быть вовсе неподвижной. Это зависит от поперечного сечения получаемого изделия и технологических возможностей обжимных машин [45].

Несмотря на то, что ротационно-обжимные машины начали применяться в промышленности в начале XX века, ротационное и радиальное обжатие как метод точной обработки металлов давлением начал широко применяться в промышленности сравнительно недавно — в 40-е годы XX века. Стремительный рост применения данного способа формообразования обусловлен внедрением машин с числовым программным управлением. Развитие оборудования расширило и область его применения [1-2]. Опыт показывает, что внедрение оборудования с программным управлением позволяет сократить до 16% машинного времени, а также существенно упростить их обслуживание [5, 48].

В годы второй мировой войны радиальное обжатие широко применялось для изготовления стволов легких артиллерийских орудий, причем профилирование производилось как по внутреннему, так и по наружному диаметру [2].

В 70-е годы XX века в ЭНИКМАШе и Рязанском заводе тяжелого кузнечно-прессового оборудования (РЗТКПО) был разработан спектр машин, развивающих усилие на бойке величиной 0,4-2,25 МН, а в 80-е годы разработаны и изготовлены

первые единичные образцы ротационно- и радиально-обжимных машин с усилием на бойке 1,6; 2,5; 4 и 10 МН, в том числе ротационно-обжимные машины с ЧПУ [2, 46, 47]. В это же время наибольшее распространение получили машины производства РЗТКПО, фирм GFM (Австрия), Usine de Wecker (Бельгия) и SACK (ФРГ).

У ротационно-ковочных машин, выпускавшихся до 80-х годов прошлого столетия, отсутствовали механизмы регулирования расстояний между бойками, а также имелись значительные ограничения по усилию деформирования, в связи с этим технологические возможности ротационного обжатия были ограничены, и деформирование деталей типа ступенчатых валов являлось малоэффективным и затруднительным. Однако в последние годы развитие данного метода формообразования происходит быстрыми темпами. Модернизация оборудования осуществляется в следующих направлениях: увеличение мощности, расширение универсальности и повышение степени автоматизации [5].

Таким образом, радиально-обжимные машины относятся к числу прогрессивного оборудования, которое за последнее десятилетие нашло применение в промышленности многих стран для изготовления заготовок валов, осей, втулок и многих других поковок. С каждым годом в различных отраслях промышленного производства расширяется номенклатура деталей, изготавливаемых методами радиального и ротационного обжатия [59, 60].

В отличие от поперечно-винтовой прокатки, где деформации заготовки происходит между вращающимися валками путем создаваемого давления с ее одновременным осевым перемещением (рисунок 1.5), при радиальном обжатии бойки «работают на удар», то есть деформация осуществляется путём частых последовательно чередующихся ударов. Это обуславливает разницу в механических свойствах получаемых заготовок деталей. Изотропия поковок намного выше, чем изотропия прокатанных деталей, поэтому износостойкость и нагрузочная способность поковок обычно выше, чем у прокатанных деталей. Поэтому для тяжелонагруженных деталей, воспринимающих крутящие и изгибающие моменты, кованые заготовки будут более предпочтительны, чем

заготовки из проката. Поперечно-винтовая прокатка весьма эффективна для изготовления червяков, крупных винтов, труб с оребрением в связи с высокой производительностью. На станах для поперечно-винтовой прокатки осуществляют и процесс прошивки сплошной заготовки.

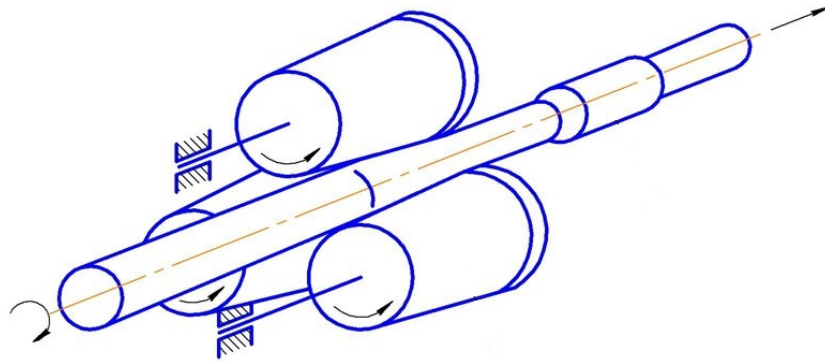


Рисунок 1.5 – Схема поперечно-винтовой прокатки

На ротационно-обжимных машинах возможно обрабатывать изделия диаметром от 0,15 мм (сплошного профиля) до 320 мм (полые заготовки); на радиально-обжимных машинах — сплошные профили диаметром до 400 мм и полые диаметром до 600 мм [1]. По технологическим возможностям радиально-обжимные машины являются более универсальными благодаря возможности изготавливать на них заготовки не только круглого, но и квадратного, прямоугольного и шестигранного сечения. Конечное поперечное сечение изделия достигается подбором формы и количества бойков, а также регулировкой их положения перед операцией.

Исследования и производственный опыт показывают, что при холодном радиальном обжатии возможно достичь точности, соответствующей 8-9 качеству с шероховатостью поверхности заготовок до $Ra = 0,8 \text{ мкм}$. Холодным обжатием хорошо обрабатывается медь, латунь, алюминий и нержавеющие стали [2]. При горячей обработке достижимая точность составляет 12-14 качеству с качеством поверхности до $Ra = 6,3 \text{ мкм}$. Для сравнительно малых степеней деформации $\varepsilon \leq 0,2$ более предпочтительной является обработка в холодном виде ввиду отсутствия необходимости нагрева заготовок до ковочной температуры, однако с ростом относительной степени деформации возрастает расходуемое усилие и

мощность деформирования. При выборе горячего или холодного способа обработки необходимо руководствоваться техническими требованиями к получаемой заготовке (ее точности и шероховатости), механическими свойствами материала заготовки и бойков, относительной степенью деформации на переходе и расходуемой мощностью [2, 6, 44].

В заготовительном производстве радиальное обжатие применяется для изготовления высокоточных осесимметричных изделий (заготовок) круглого, квадратного, прямоугольного и шестигранного сечений, а также переменного сечения с конусными участками различной длины. Например, заготовки вагонных осей почти во всех странах мира изготавливают с помощью радиального и ротационного обжатия [5, 74].

В работах Радюченко Ю.С., Тюрина В.А. и Деордиева Н.Т. отмечено, что к основным особенностям процесса радиального обжатия относятся [1, 2, 5, 24, 25]:

1. Высокое качество поверхности изделия при высокой производительности и незначительном приложении внешних усилий на сравнительно малых участках.
2. Повышение пластических свойств обрабатываемого материала в результате циклического приложения нагрузки в процессе обжатия.

К преимуществам радиального обжатия можно отнести сравнительно высокую производительность, удобство механизации и автоматизации процесса, а также возможность получения изделий большой длины с незначительной кривизной [3]. Применение радиального обжатия является целесообразным для таких заготовок, для которых выполнение термообработки в конце технологического процесса затруднено.

Опыт производства показывает [1, 3-5, 48-51], что по сравнению со свободной ковкой себестоимость заготовок, изготавливаемых радиальным обжатием при средне- и крупносерийном типе производства, ниже на 5% для изделий из конструкционных сталей, на 15% – из инструментальных и на 20% – из быстрорежущих сталей. Стоимость 1 тонны поковок, полученным радиальным обжатием, составляет около 70–80% стоимости поковок, полученных другими известными способами [4, 5].

Основы теории и технологии радиального и ротационного обжата в значительной мере базируются на результатах научных работ и исследований Радюченко Ю.С., Деордиева Н.Т., Тюрина В.А., Лазоркина В.А., Поспелова И.А., Голенкова В.А., Унксова Е.П., Заварцевой В.М., Павлова И.М., Любвина В.И., Могильного Н.И., Радченко С.Ю., Баркой В.Ф., Ионова П.И., Королева В.Н., Моисеева В.М., Шнейдера Ю.Г., Ястребова В.Ф., Бородина Н.М., Рудакова Б.П., Степанова Е.В., Новикова В.М., Мошнина Е.Н., Филимонова Ю.Ф., Kalpakcioglu S., Green R.E., Zhen L., Packham C.L. и других.

Технология изготовления и проектирование обжимного инструмента является одним из основных факторов, обеспечивающих эффективность процесса обжата. Именно на данном этапе закладывается основа точности обработки и качества поверхности изделия, которую предполагается получить. [1].

Экономическая целесообразность изготовления изделий (заготовок) радиальным обжатием в значительной мере определяется затратами на инструмент, которые зависят от геометрических характеристик, материала инструмента, конфигурации заготовки, условий трения и режимов деформирования [75, 76]. Следовательно, при разработке инструмента важно исходить не только из режимов обжата и минимального количества переходов, необходимых для получения изделия определенной конфигурации, но и его стойкости, долговечности и возможности ремонта. Таким образом, модернизация обжимного инструмента является актуальным направлением исследований радиального и ротационного обжата.

1.1 Технические требования, предъявляемые к обжимному инструменту

В качестве инструмента для радиального и ротационного обжата применяются бойки для формообразования наружных поверхностей и оправки – для внутренних [1-4].

Радюченко Ю.С. в своих работах [2, 25, 42] отмечает, что при проектировании инструмента совместно решаются две основные задачи:

1. Обеспечение заданных технических требований обрабатываемой заготовки (размерная точность, отклонения формы и расположения, качество поверхности и т.д.).

2. Минимизация затрат на изготовление инструмента.

На этапе конструирования и выбора геометрических параметров бойков закладывается точность обработки и чистота обрабатываемой поверхности [1, 4]. Типовые конструкции бойков, применяемых для радиального и ротационного обжата цилиндрических и конических изделий, представлены на рисунке 1.6.

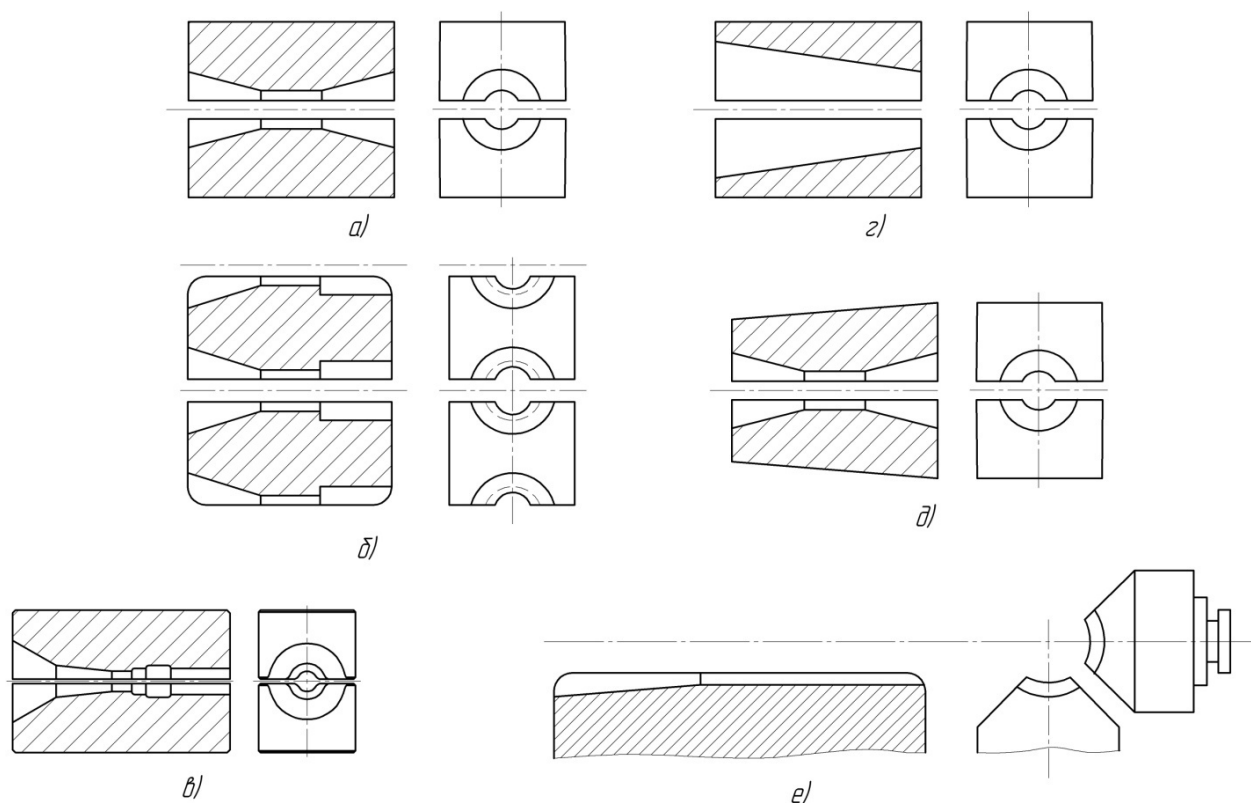


Рисунок 1.6 – Радиально-обжимные бойки

Технические требования к нерабочим поверхностям бойков зависят от условий крепления к механизму обжата. Для ротационно-обжимных машин наружный контур бойков обычно выполняется в соответствии с размерами пазов шпинделя, в котором они впоследствии перемещаются (рис. 1.6а, 1.6в). Торцы бойков, по которым осуществляется контакт с ползунами через компенсационные прокладки, имеют плоскую поверхность. В двухшпиндельных машинах торцовая поверхность имеет наклон $2-4^\circ$ (рис. 1.6д), потому что поверхность ползуна,

соприкасающаяся с бойком, также имеет наклон в обратную сторону по отношению к торцу бойка. С целью увеличения срока службы инструмента рабочий профиль бойка выполняют на двух (рис. 1.6б) или всех четырех плоскостях бойков, если позволяют их размеры. С этой же целью в конструкции бойков предусматривается второй заходный конус. Бойки для радиально-обжимных машин отличаются от ротационно-обжимных только нерабочей частью внешнего контура, который определяется конструкцией узла крепления к подвижным частям обжимного механизма [1].

Внутренний контур рабочей поверхности бойков может иметь различную конфигурацию, определяемую формой деформируемой заготовки. В ряде работ [1, 5, 24, 52, 53, 72] отмечено, что именно внутренний профиль ручья оказывает влияние на характер деформирования, напряженно-деформированное состояние заготовки, энергосиловые параметры процесса, а также условия захвата и скорость подачи. Следовательно, при разработке бойков профилирование рабочего участка влияет как на энергосиловые параметры процесса (усилие, мощность, работа деформирования и т.д.), так и на стойкость самого бойка и обжимного механизма машины.

В бойках, использующихся для одноступенчатого обжатия, рабочий профиль имеет один калибрующий цилиндрический участок (рис. 1.6б, 1.6д, 1.6е). Конструкция бойков для многоступенчатого обжатия предусматривает несколько калибрующих участков (рис. 1.6в).

На основе производственного опыта можно утверждать, что от точности изготовления инструмента зависит точность получаемой заготовки, поэтому бойки, входящие в один комплект, необходимо обрабатывать либо совместно, либо от одинаковых базовых поверхностей с применением специальных приспособлений [1, 24]. Расположение радиуса сопряжения заходного конуса с цилиндрической частью должно быть одинаковое для всех бойков, входящих в один комплект. И высота бойка на всей длине должна быть постоянная с минимальным отклонением от параллельности граней. Основные конструктивные

размеры бойков и требования взаимного расположения поверхностей представлены на рисунке 1.7.

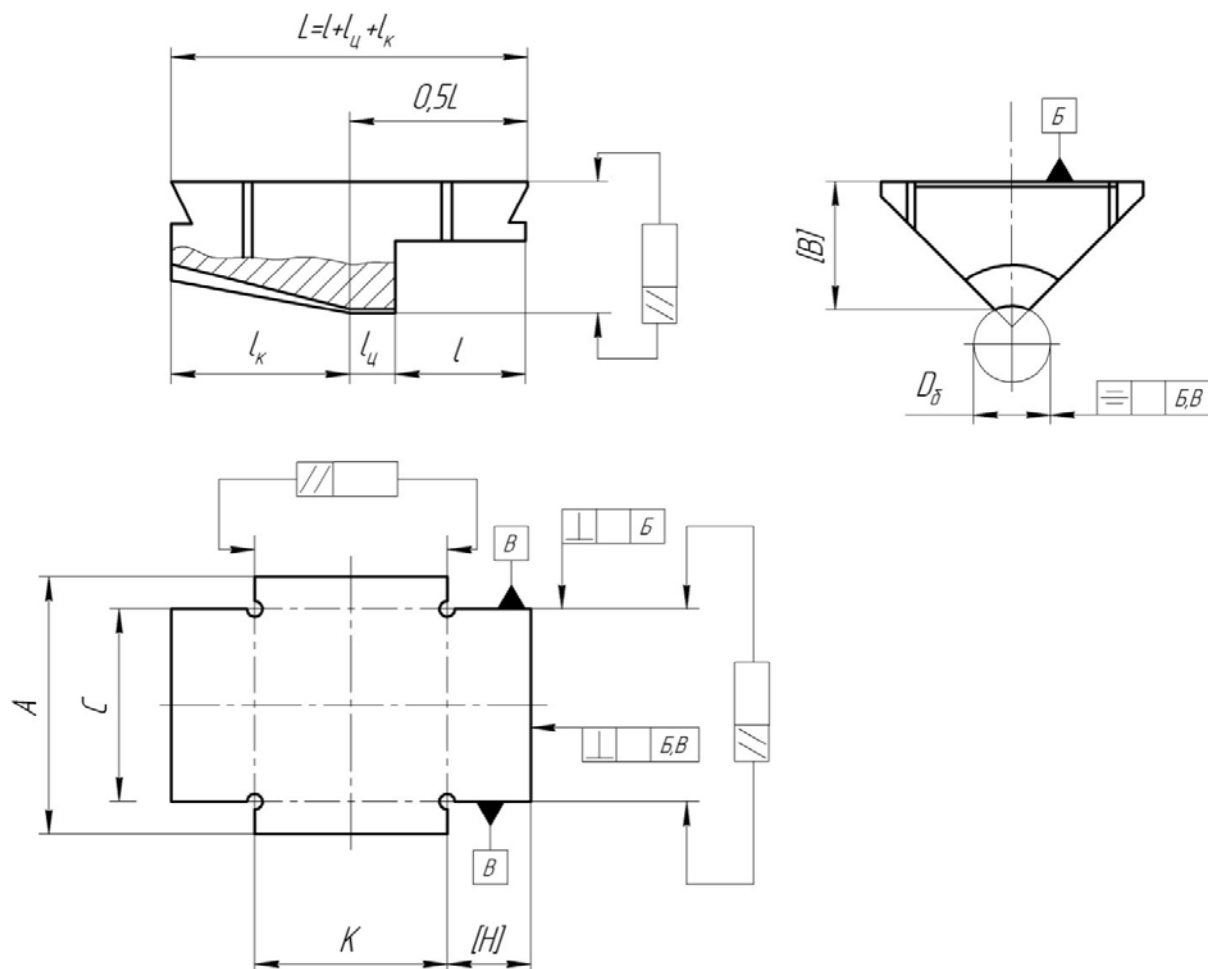


Рисунок 1.7 – Эскиз бойка для профильного обжатия с одним заходным конусом [4] (количество бойков в комплекте – 4 шт.): размеры в квадратных скобках выдерживать одинаковыми для комплекта; размеры L , A , C , H и K определяются конструкцией обжимной машины

Зарубежный опыт проектирования инструмента для радиального обжатия, показывает, что наиболее жесткие требования предъявляются к шероховатости профиля ручья бойков. По данным американской фирмы Fenn точность профиля ручья бойков должна превышать на один квалитет требуемой точности получаемых изделий. Для достижения требуемой чистоты поверхности рабочий профиль подвергают полированию и доводке различными пастами. Шероховатость профиля бойков должна быть не ниже той шероховатости, которая предъявляется к обработанной заготовке [54, 55]. В целях повышения

качества поковок, улучшения условий захвата и увеличения деформации в осевом направлении рабочая поверхность бойков иногда выполняется волнообразной.

Радюченко Ю.С. и Любвин В.И. в своих работах [42, 43] пришли к выводу, что выбор количества бойков осуществляется в зависимости от необходимого усилия обжатия. При этом лучшее качество поверхности достигается при обработке на двухбойковых машинах, потому что при увеличении числа бойков уменьшается площадь контакта заготовки с инструментом. Обработку заготовок диаметром менее 5 мм следует производить на двухбойковых машинах. Использование комплекта из 4 и более бойков позволяет деформировать крупные заготовки с приложением больших усилий. В этом случае относительно небольшие рабочие поверхности бойков не вызывают чрезмерно больших нагрузок на звенья обжимного механизма.

Для изготовления обжимного инструмента может использоваться широкая номенклатура разнообразных материалов. Радюченко Ю.С., Лазоркин В.А. и Тюрин В.А. в работах [1, 57] систематизировали номенклатуру материалов для изготовления бойков. В качестве материала используются легированные стали 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХГС, 5ХВТ, 5ХНВ, 5ХГСВФ, 5ХЗГС, 7ХЗ, 3Х2В8, твердый сплав ВК20 и прочие материалы. На предприятиях СССР для обжатия концов труб применялись бойки, изготовленные из подшипниковой стали ШХ15 [2]. В 1950-1960 годы широко применялась быстрорежущая сталь Р18. Семенов Е.И. в справочнике [4] отмечает, что стойкость обжимных бойков из стали 4Х4МВФС по сравнению с инструментом из сталей 5ХНВ, 5ХНМ, 7ХЗ выше в 3-4 раза, а в сравнении с 4ХЗВМФ — в 1,5-2 раза. Для холодного обжатия используются инструментальные углеродистые и легированные стали У8, У10, ХВГ, 5ХВ2С, Х12Ф1, ХВ5, а также твердые сплавы ВК15 и ВК20. Для труднодеформируемых материалов рекомендуется применение сталей 18Х2Н4ВА и 12Х2Н4А с последующей цементацией на глубину 2...3 мм. При горячем деформировании допускается изготовление инструмента из легированных, инструментальных и быстрорежущих сталей. Материалы, применяющиеся для производства бойков холодного обжатия должны выдерживать давление 150...200 кгс/мм² [1, 58, 61].

При деформировании заготовок малых сечений рекомендуется использовать в качестве материала бойков вольфрамовые сплавы, а для больших сечений – хромоникелевые сплавы с наплавкой слоя стеллита или нимоника. Полые заготовки могут обрабатываться инструментами из сталей 40 и 45 с наплавкой профиля ручья электродами марок ЭН-60М и последующей электроимпульсной обработкой [4].

В работе Тюрина В.А. [5] сказано, что для повышения износостойкости рабочая поверхность бойков может быть наплавлена твердыми сплавами — цельзитом и терманитом. Данные сплавы имеют хорошую свариваемость. На некоторых предприятиях СССР наплавку бойков, изготовленных из сталей 5ХНМ, 5ХГМ, 3Х2В8, осуществляли стеллитом и сормайтотом. Наплавка бойков осуществляется электродами марок ОЗИ-4 и ОЗИ-5. Прокладки для регулировки закрытой высоты ручья бойков изготавливаются из углеродистых инструментальных сталей У7 и У8 с закалкой до твердости HRC 40...42.

При изготовлении инструмента особенно важно учитывать выбор исходных заготовок и термическую обработку. Экспериментально установлено [2, 70], что лучшими механическими свойствами обладают бойки, изготовленные из кованых заготовок. Твердость рабочей поверхности бойков назначается в зависимости от твердости обрабатываемого материала. Обычно после термообработки рабочие полости должны иметь твердость HRC 55...64. Бойки из инструментальных сталей с высоким содержанием ванадия, закаливают до твердости HRC 65...67. Если бойки будут иметь недостаточную твердость, то это приведет к их быстрому износу, сокращению общей и межремонтной стойкости, низкой точности обработки, а также повышенному износу обжимного механизма [62]. Напротив, избыточная твердость приводит к повышенной хрупкости и раскалыванию инструмента. Изношенный инструмент может быть восстановлен перешлифованием и навариванием (или наплавлением) слоя твердого сплава.

На основе работ Радюченко Ю.С., Тюрина В.А., Лазоркина В.А., Любвина В.И. проведен обзор технических требований, предъявляемых к обжимным бойкам. В результате установлено, что наиболее жесткие требования

предъявляются к изготовлению внутреннего контура бойков, где осуществляется деформация заготовки. В связи с этим, наиболее ответственным этапом проектирования бойков является назначение геометрических характеристик, а также экономическая целесообразность применения радиального обжатия в значительной степени зависит от применяемого инструмента.

1.2 Характеристика геометрических элементов бойков, влияющих на процесс радиального обжатия

Алиев И.С., Жбанков Я.Г. и Периг А.В. в своей работе [52] предложили классификацию факторов, которые влияют на напряженно-деформированное состояние (НДС) заготовки. К ним относится форма инструмента и заготовки, кинематический и температурный факторы. В исследовании Погорильчук А.Я. [7] отмечено, что непосредственно на процесс радиального обжатия влияют геометрические характеристики применяемого инструмента и режимы деформирования. Проведенный анализ работ позволил разбить все параметры радиального обжатия на три группы: напряженно-деформированное состояние заготовки, режимы деформирования и геометрические характеристики обжимных бойков. При этом две последние группы факторов оказывают непосредственное влияние на процесс деформирования заготовок (рисунок 1.8).

Тюрин В.А. и Радюченко Ю.С. в своих работах [1, 5, 42, 53] подтверждают, что геометрические характеристики бойков оказывают наибольшее влияние на процесс радиального обжатия, а именно на усилие и потребляемую мощность, т.е. на энергосиловые параметры.

Геометрические элементы бойков определяются конфигурациями внешнего и внутреннего контура, профилем сечения ручья, соотношением длин заходной и калибрующей части и т.д. При этом диаметр ручья принимается по максимальному диаметру заготовки, а закрытая высота — по минимальному.

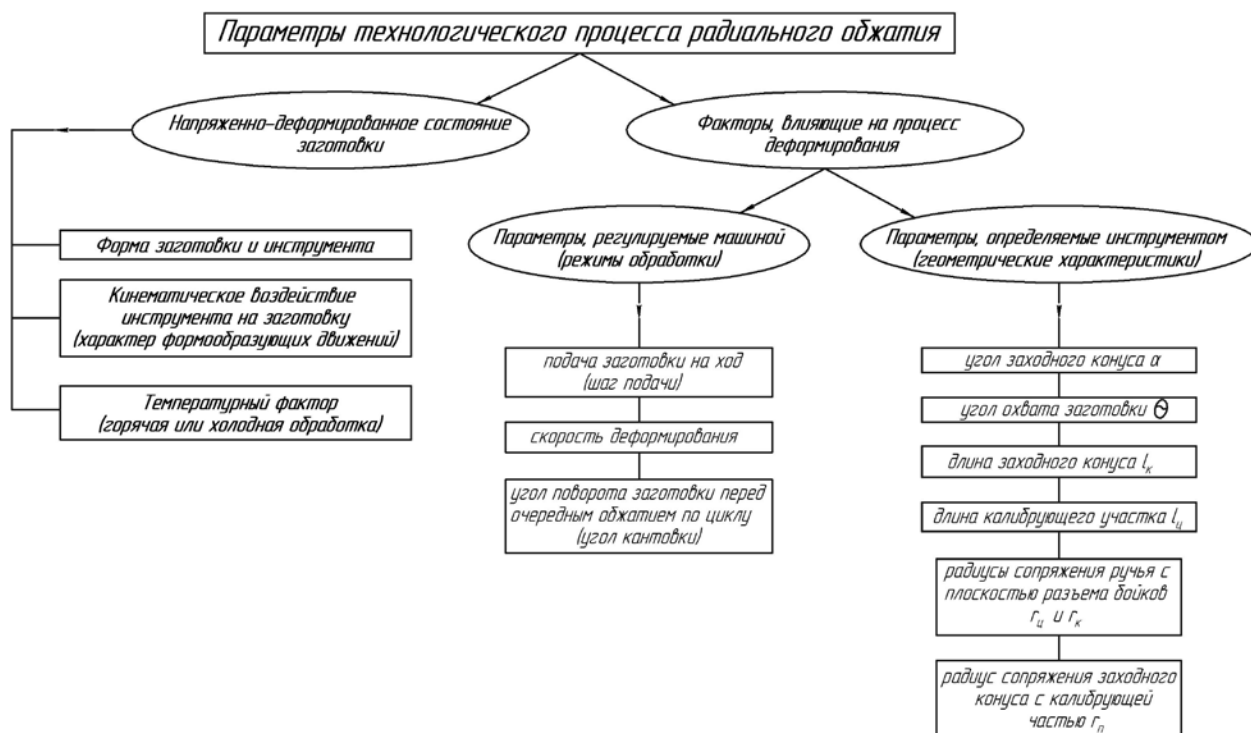


Рисунок 1.8 – Параметры процесса радиального обжатия

Ряд авторов в своих работах [1, 4, 5, 7] указывают, что профиль ручья радиально-обжимных бойков имеет следующие основные геометрические элементы, которые влияют на технологический процесс радиального обжатия, энергосиловые параметры, неравномерность деформаций и общее деформирующее усилие (рисунок 1.9):

- угол заходного конуса бойка α , °;
- угол охвата заготовки бойками θ , °;
- длина заходного конуса l_k , мм;
- длина калибрующего участка ручья $l_{ц}$, мм (цилиндрический участок);
- радиусы сопряжения профиля ручья с плоскостью разреза $r_{ц}$ и r_k , мм;
- радиус сопряжения конического и цилиндрического участков ручья r_n , мм.

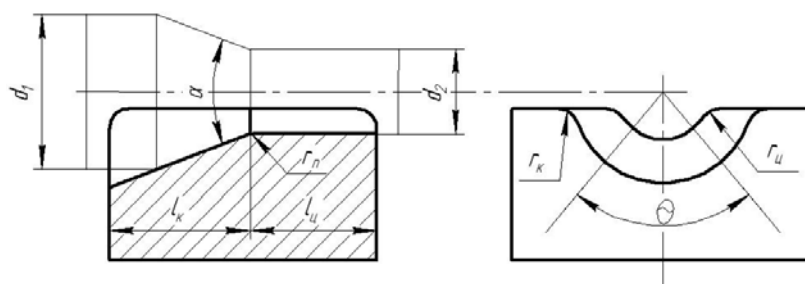


Рисунок 1.9 – Геометрические элементы обжимных бойков [4]

Авторами показано, что из всех перечисленных геометрических элементов наибольшее влияние на энергосиловые параметры обжатия оказывает заходный конус α , который в большей мере задействован в процессе деформирования.

Задача выбора рационального угла заходного конуса α подробно рассмотрена в работах [1-2]. Важно отметить, что при обжатии цилиндрических участков заходный конус выступает в роли средства для уменьшения поперечного сечения исходной заготовки. На основе проведенных автором экспериментов можно сделать вывод, что угол заходного конуса принимается в зависимости от твердости и механических свойств обрабатываемого материала. Рациональный выбор угла заходного конуса позволит повысить производительность обработки в 1,5 раза. При холодном деформирования наибольшее упрочнение заготовки наблюдается в поверхностных слоях. В бойках для деформирования в горячем виде при небольших степенях деформации заходный конус может отсутствовать, и процесс обжатия происходит непосредственно в цилиндрическом ручье. Увеличение угла заходного конуса объясняется большей пластичностью обрабатываемого материала в нагретом состоянии [61, 63]. В случае деформирования заготовок конусной формы заходный конус имеет, как правило, такой же профиль обрабатываемой детали. Как отмечает автор, наиболее оптимальным будет такой выбор угла заходного конуса α , при котором неравномерность деформации заготовки не приведет к ее разрушению.

Существует несколько производственных рекомендаций по определению оптимального угла заходного конуса бойка. Например, на ротационно-обжимных машинах фирмы Bullivent (Великобритания) данный угол принимается равным 17-18°, а на поверхности бойков наносится тщательно отполированная насечка глубиной 0,5 мм, шагом 3,3 мм с целью улучшения условий захвата. На американской фирме Cincinnati на оправках заходный угол выбирается равным около 6° при обработке деталей в холодную [64]. На предприятиях Чехословакии заходный конус для обработки заготовок из высокоуглеродистых и легированных сталей принимался в пределах 8-9°, при деформировании цветных металлов — 35°, а при обработке полых деталей — до 55°. На ротационно-обжимных машинах

с усилиями 3,4 и 10 МН применялись бойки с углом заходного конуса $\alpha = 8^\circ$. В ротационно-обжимных автоматах производства СССР заходный конус α принимался равным 8° для производства конических штифтов, 11° — для обжатия шпинделя веретена, $20...30^\circ$ — для деформирования острия швейных игл диаметром $0,3...0,75$ мм, $5...10^\circ$ — для деформирования игл диаметром $0,3...0,22$ мм [65]. При деформировании заготовок из вольфрамовых и молибденовых сталей угол заходного конуса составляет 90° . Данное увеличение угла объясняется большей пластичностью обрабатываемого материала в горячем виде и наличием в большинстве случаев механической подачи заготовок в зону обработки [66, 71]. При ручной подаче заготовок для горячего формообразования нужно предусматривать меньшую величину заходного конуса.

В работах [1, 2, 7] авторы систематизировали практические указания по выбору углов конусности бойка. В частности, рекомендации по назначению угла заходного конуса α в зависимости от относительной степени обжатия на переходе ε приведены на рисунке 1.10.

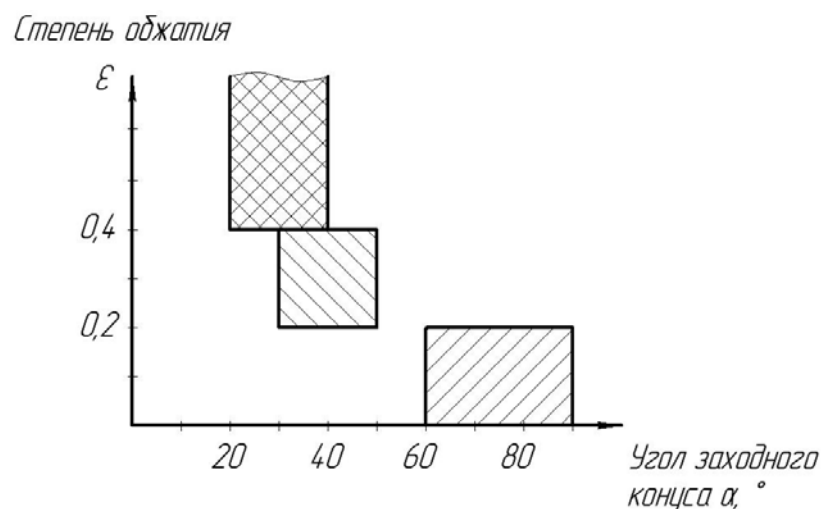


Рисунок 1.10 – Диаграмма по выбору рациональных углов заходного конуса по относительной степени деформации [1]

В результате анализа производственных данных можно отметить, что угол заходного конуса принимается в зависимости от твердости обрабатываемого материала, типа обработки (в горячем или холодном виде), коэффициента трения поверхности инструмента с заготовкой μ и относительной степени деформации на

переходе ε . При этом наиболее важным критерием выбора угла заходного конуса является относительная степень деформации на переходе.

Радюченко Ю.С. отмечает, что снижение угла до $12...15^\circ$ позволяет уменьшить глубину утяжин на торцах поковок при деформировании в горячем виде [1]. Следовательно, с повышением твердости и прочности обрабатываемого материала более предпочтительно применение бойков с меньшими углами заходного конуса. При профильном обжатии (рисунок 1.4) углы конусов (профильного α_1 и обратного α_2) берутся равными или немного большими требуемого угла конуса получаемого изделия.

В конструкции бойков иногда предусматривается второй заходный конус (рисунок 1.11). В литературе говорится, что это позволяет улучшить энергосиловые показатели обжатия и тем самым продлить срок службы бойка [4].

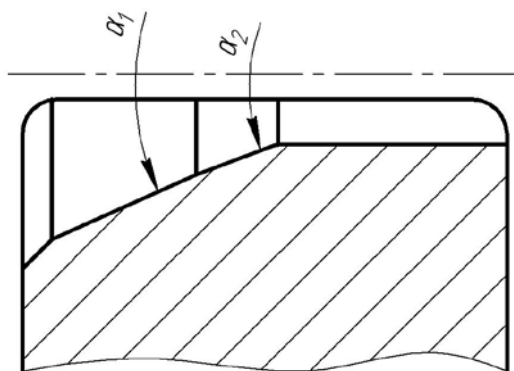


Рисунок 1.11 – Конструкция бойка с двойным заходным конусом

Угол охвата заготовки бойками θ влияет на формирование очага деформации заготовки. В исследованиях Дмитриевой А.Я. [8, 78] проведены сравнительные испытания бойков с углами охвата 115° , 135° и 155° по влиянию величины угла охвата на механические свойства заготовки за счет анализа накопленных деформаций и средних напряжений. Результаты эксперимента показывают, что применение бойков с углом охвата 155° является наиболее рациональным, т.к. заготовки можно подвергать более высоким степеням деформации, при этом достигается высокая чистота поверхности обрабатываемого материала, повышенные показатели прочности и пластичности

заготовок после обработки. Следовательно, заготовки имеют большой запас пластичности и улучшенные прочностные свойства без образования дефектов.

Отдельно стоит отметить, что обработка малопластичных и хрупких материалов требует близкого воспроизведения всестороннего равномерного сжатия. Для соблюдения этого условия Радюченко Ю.С., Власов А.В. и Погорильчук А.Я. рекомендует принимать угол охвата не менее 150° [1, 79]. Однако при горячем обжатии угол охвата принимается в диапазоне $\theta = 90 \dots 120^\circ$, причем исходя из опыта поперечно-винтовой прокатки большие значения предпочтительны для малопластичных материалов ввиду большей площади контакта инструмента с заготовкой.

На основе результатов эксперимента Зверева Н.Ф. [11] можно сделать вывод, при малых углах охвата наряду с появлением растягивающих напряжений в центре сечения заготовки может возникнуть усиленное продольное скручивание волокон металла. Такого же мнения придерживается и Радюченко Ю.С., который утверждает, что для деформирования прутков диаметром менее 8 мм угол охвата θ рекомендуется принимать более 100° [1]. Им определена зависимость “ $\theta - \alpha$ ” между величиной угла охвата заготовки и углом заходного конуса (рисунок 1.12).

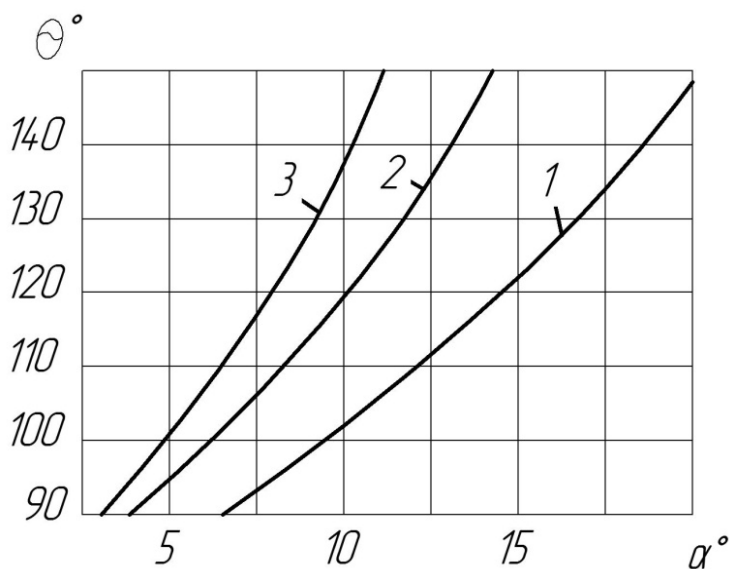


Рисунок 1.12 – График для определения угла охвата заготовки бойками θ [1]:

1 – стали и цветные сплавы $HB < 163$; 2 – материалы $HB 163 \dots 190$;

3 – твердые материалы $HB > 190$

Исходя из значения угла α , можно определить угол θ для конкретного бойка. При определении данной зависимости было принято допущение, что наибольшему углу α , рекомендуемому для определенного типа обрабатываемого материала, должен соответствовать максимальный угол θ . Однако представленная Радюченко Ю.С. зависимость не в полной мере учитывает остальные геометрические элементы бойка и условия процесса деформирования.

Исходя из опыта поперечно-винтовой прокатки в калибрах не рекомендуется принимать угол охвата θ заготовки менее 80° в связи с сильным скручиванием поверхностных слоев заготовки [87].

Влияние длины заходного конуса l_k на технологический процесс обжатия исследовали Радюченко Ю.С. и Зверьев Н.Ф. Ссылаясь на их работы [1, 2, 12], можно прийти к выводу, что длина заходного конуса l_k зависит от угла заходного конуса α и степени обжатия на переходе ε . При этом минимальная длина определяется из условия [2]:

$$l_k = \frac{d_2 - d_1}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}},$$

где d_2 – диаметр исходной заготовки, мм;

d_1 – диаметр после обработки, мм.

Однако для свободного входа заготовки в бойки длина заходного конуса может быть увеличена. В исследовании [1] утверждается, что конусная часть l_k должна составлять не более 60% от всей длины бойка. Такой же результат получен и в работе [12], где автор подтверждает, максимальная длина заходного конуса не должна превышать его средний диаметр более чем в 7-10 раз. Важно отметить, что авторами так и не было дано однозначного решения по определению рационального угла заходного конуса и его длины.

Влияние длины калибрующего участка $l_{\text{ц}}$ на технологию радиального обжатия рассмотрено в работе [7], по результатам которого сделан вывод, что длина калибрующего участка $l_{\text{ц}}$ влияет на шероховатость получаемой поверхности заготовки, предельную степень деформации, величину усилия, а

также стойкость инструмента. В работе главным образом отмечено, что малые значения величины калибрующего участка приводят к низкой точности и качеству поверхности обрабатываемого материала. Напротив, длинные участки способствуют раннему разрушению инструмента. По рекомендациям Радюченко Ю.С. длина калибрующего участка на практике колеблется в пределах [2]:

$$l_y = (0,7...2)l_k$$

Эксперименты, проведенные автором доказывают, что получение чистой поверхности с высокой точностью достигается применением цилиндрического участка l_y , длина которого составляет $0,8d_2$ при степенях деформаций $\varepsilon \leq 0,25$ и $1,2d_2$ при $\varepsilon > 0,25$. Однако при меньших соотношения длины цилиндрического участка к конечному диаметру заготовки l_y/d_2 требуемая точность не достигается. Напротив, избыточные длины калибрующих участков приводят к увеличению дополнительных калибровочных усилий [1].

Радиусы сопряжений ручья с плоскостью разъема бойков r_k и r_y определяют ширину очага деформации, т.е. отношение ширины ручья к его диаметру — так называемую овальность ручья. По рекомендациям [5, 66] радиусы сопряжений профиля ручья с плоскостью разъема бойков принимаются равными $r_y = 0,25d_1$ и $r_k = 0,15d_1$. Однако при деформировании труб радиусы сопряжений должны превышать толщину стенки трубы.

На границе перехода заходного конуса в цилиндрическую часть происходит максимальная деформация материала с сопутствующим возникновением максимального давления и силы трения. Это может вызвать налипание металла в этом месте бойков, что приводит к затрудненной подаче изделий, ухудшению качества обработки поверхности и снижению стойкости инструмента. Результаты экспериментов Любвина В.И. [13] доказывают, что радиус сопряжения конического участка с цилиндрическим r_n рекомендуется принимать в зависимости от твердости обрабатываемого материала. Автором отмечено, что

для полного исключения вероятности защемления заготовки в ручье бойка радиус сопряжения r_n должен соответствовать соотношению:

$$\frac{2r_n}{d_1} > 1$$

Соблюдение этого условия повышает долговечность инструмента и обеспечивает требуемую чистоту поверхности после деформирования. В целях предотвращения налипания металла рабочие полости бойков, в частности место перехода конического участка в цилиндрический, необходимо полировать до шероховатости $Ra\ 0,8\ \text{мкм}$.

При радиальном обжатии могут применяться угловые (ромбические) и радиусные бойки (рисунок 1.13).

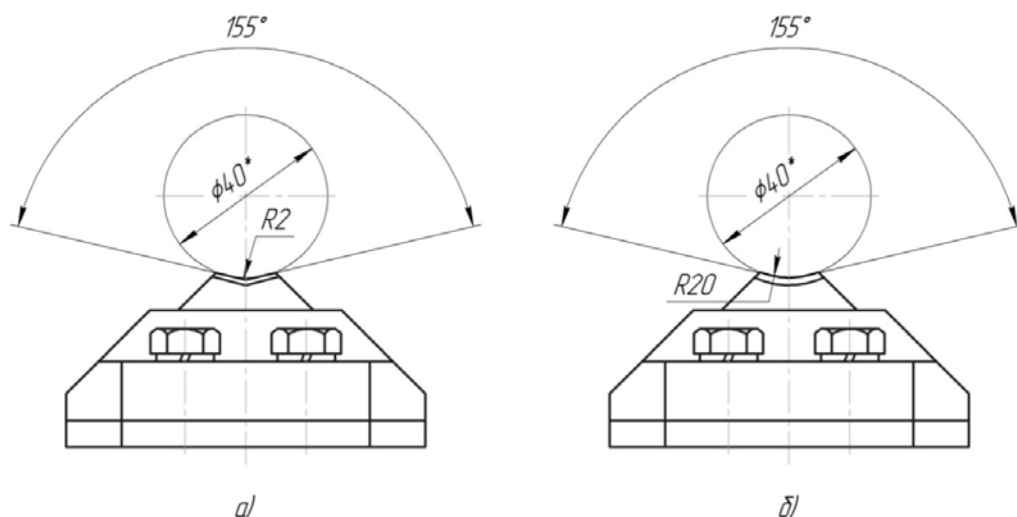


Рисунок 1.13 – Бойки для обжатия с одинаковым углом охвата заготовки $\theta = 155^\circ$:

а) угловой; б) радиусный [7, 8]

В работе [7] отмечено, что радиусный боек отличается сравнительной простотой изготовления по сравнению с угловым и получением более равномерного профиля обрабатываемой поверхности. Контакт заготовки с радиальным инструментом происходит по одной сплошной поверхности, в то время как при обжатии угловым бойком площадь контакта охватывает две плоские поверхности. Следовательно, площадь соприкосновения заготовки круглого сечения по радиусу будет выше, чем по двум плоскостям, и при деформировании радиусными бойками будут требоваться большие силы.

Дальнейшие результаты, опубликованные в работе [8] показывают, что деформирование заготовок радиусными бойками нужно производить с более высокими степенями деформаций, но при этом вероятность разрушения обрабатываемых заготовок будет ниже, чем при обжатии угловыми бойками. Такие инструменты обеспечивают более чистую поверхность обрабатываемого материала. Однако применение угловых бойков позволяет снизить необходимое усилие обжатия.

В результате проведенного анализа влияния геометрических элементов обжимных бойков на основные показатели процесса радиального обжатия разработана матрица, представленная в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Матрица влияния геометрических элементов бойков на параметры процесса обжатия

Параметры процесса	Геометрические элементы бойка					
	α	θ	l_k	l_y	r_y, r_k	r_n
<i>1. Качество получаемых изделий</i>						
1.1. Точность диаметральных размеров	–	–	–	+	+	–
1.2. Шероховатость	–	+	–	+	–	+
1.3. Наличие дефектов заготовки	+	+	+	+	+	+
<i>2. Производительность</i>						
2.1. Скорость деформирования V_n	+	*	+	*	+	*
2.2. Шаг подачи заготовки S_n	+	*	+	*	+	*
<i>3. Механические свойства обрабатываемой заготовки</i>						
3.1. Прочность	–	+	*	–	+	–
3.2. Пластичность	–	+	*	–	+	–
3.3 Напряженно-деформированное состояние	+	+	+	+	+	+
<i>4. Стойкость инструмента</i>	+	*	*	+	+	+
<i>5. Энергосиловые параметры</i>						
5.1. Усилие обжатия	+	–	*	*	–	*
5.2. Работа формоизменения	+	–	*	*	–	*
5.3. Мощность деформирования	+	–	*	*	–	*

Примечание: "+" – фактор оказывает влияние на параметр процесса;

"–" – фактор не оказывает влияние на параметр процесса;

"*" – характер влияния не изучен

Обзор работ позволяет установить, что в настоящее время отсутствует единые рекомендации и методика рационального выбора геометрических элементов обжимных бойков, а также недостаточно изучено влияние профиля обжимного инструмента на его стойкость и энергосиловые параметры деформирования.

Выбор оптимальных значений геометрических элементов бойков должен обеспечить, с одной стороны, соответствующее качество и производительность обработки, с другой — минимальное усилие и мощность деформирования (энергозатраты) при наименьшем износе в процессе эксплуатации.

1.3 Известные методы повышения стойкости и улучшения конструкций обжимных бойков

В работах [1, 2] отмечено, что нарушения технических требований, относящихся к геометрическим элементам и конфигурации рабочего профиля инструмента, могут привести к преждевременному износу и раскалыванию. В приведенной автором статистике выявлено, что наибольшее число поломок инструмента (до 90%) происходит из-за несоответствия рекомендуемым значениям угла охвата заготовки θ и радиусов сопряжений $r_{\text{ц}}$ и $r_{\text{к}}$.

Максимальному износу бойков подвергается заходный конус — область, где осуществляется основная работа деформирования. В результате образуется кольцевая канавка в месте контакта конической полости бойка с торцем заготовки (рисунок 1.14а). Это приводит сначала к затруднению, а затем невозможности подачи заготовки и разрыву бойка. Данный характер износа отчетливо проявляется, когда торец заготовки не заточен или заточен таким образом, что контакт бойка и заготовки осуществляется по кольцевой линии. В работе [1] дана рекомендация, что для уменьшения износа рекомендуется затачивать торец заготовки (или выполнить скос) на угол, равный углу конуса бойка (рисунок 1.14б). Предлагаемое решение снижает удельное давление на инструмент во

время обработки и способствует меньшему износу бойка на участке заходного конуса.

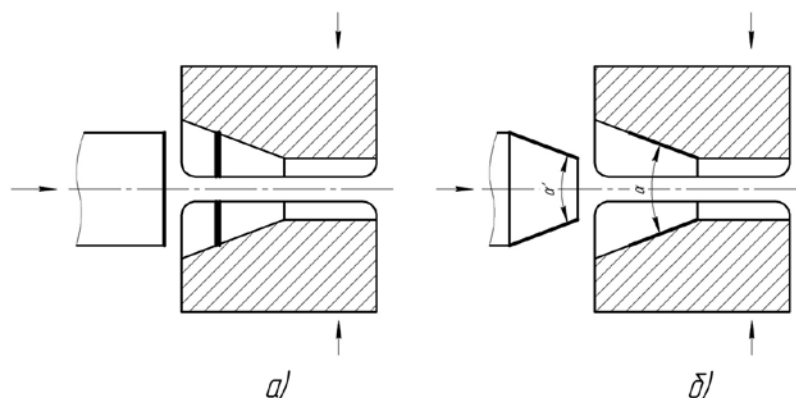


Рисунок 1.14 – Износ бойка на участке заходного конуса:

- а) схема образования кольцевой канавки; б) метод уменьшения износа заходного конуса с помощью скоса торца заготовки (место контакта заготовки с инструментом отмечено утолщенными линиями)

В работах автора [1, 67] указано, что в бойках для профильного обжата изнашивается как заходный α , так и профильный конус α_1 (рисунок 1.15). Но износ имеет более равномерный характер по всей рабочей поверхности, т.к. при переменной степени обжата место контакта инструмента с заготовкой изменяется после очередного шага подачи.

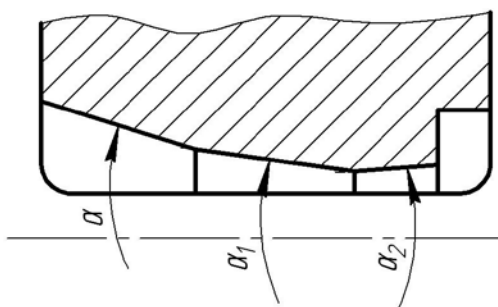


Рисунок 1.15 – Боек для профильного обжата: α – угол заходного конуса;

α_1 – профильный конус; α_2 – обратный конус

В исследованиях Радюченко Ю.С., Сусллова Л.М. и Дзугутова М.Я. [67-69] отмечено, что стойкость бойков при холодном обжатии заготовок сплошного сечения диаметром до 20 мм с увеличением угла заходного конуса $\alpha > 20^\circ$

снижается примерно на 10...15%. Кроме того, образование окалина при горячем деформировании также снижает стойкость бойков. Поэтому стойкость инструмента для вертикальных радиально-обжимных машин выше в сравнении с бойками для горизонтальных обжимных машин в связи с тем, что окалина после каждого обжатия полностью удаляется из комплекта бойков.

Калибрующий участок влияет на точность обработки и шероховатость обрабатываемой поверхности. На основании проведенных экспериментов показано, что при малых длинах калибрующего участка l_u заготовка после обжатия обладает низкими параметрами по чистоте и точности [1-2]. Однако в работах Зверева Н.Ф. [11, 12] отмечено, что длинные калибрующие участки способствуют раннему разрушению и росту деформирующих усилий. Особенно это проявляется в диапазонах деформаций при $\varepsilon < 0,2$, когда усилие калибровки способно достигать значений, которые превышают в 4-5 раз основной усилие деформирования на участке заходного конуса [1]. Таким образом, ряд авторов отмечают, что выбор рациональной длины калибрующего участка оказывает влияние на стойкость инструмента.

Выявлено, что износ бойков может проявляться в уменьшении овальности поперечного сечения бойков, что приводит к увеличению контактной поверхности ручья с заготовкой [1]. Эксперименты, проведенные Чарльзом У. [14] позволяют прийти к выводу, что наиболее рациональное расстояние от поверхности контакта до края ручья составляет не менее $0,25r_{pk}$ или $0,25r_{pc}$, а до торца бойков не менее $0,25r_{pk}$. Увеличенная поверхность контакта определяется по отполированному ручью бойка. Для повышения стойкости инструмента Радюченко Ю.С. дает практические рекомендации [1]:

1. Снятие наклепа отжигом перед операцией деформирования способно повысить стойкость инструмента на 10-15% при прочих равных условиях, т.к. образование наклепа на поверхности обрабатываемых заготовок отрицательно сказывается на стойкости бойков и исполнительных органов оборудования. Образование наклепа приводит к уменьшению срока службы инструмента и обжимного механизма.

2. Использование смазок в процессе деформирования снижает коэффициент трения между заготовкой и бойком. Для охлаждения бойков может применяться как смазка, так и обдувка воздухом.

Вопросами улучшения конструкций обжимных бойков занимался ряд ученых, среди которых следует выделить Радюченко Ю.С., Тимергалеева Р.М., Сапуткина Е.П., Макарова А.И., Тюрина В.А., Троицкого В.П. В СССР этими авторами было опубликовано несколько авторских свидетельств [6, 9, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21], направленных на повышение производительности, уменьшения усилия и мощности, а также повышения стойкости обжимных бойков. Среди них можно выделить четыре метода улучшения конструкции обжимных бойков с целью повышения стойкости, производительности и уменьшения энергозатрат:

1. Применение твердосплавных вставок на рабочем профиле ручья инструмента.
2. Изменение геометрической конфигурации профиля ручья.
3. Улучшение напряженно-деформированного состояния инструмента в процессе обработки путем снижения контактных давлений на установочные поверхности.
4. Повышение механических свойств материала инструмента.

Далее по порядку рассмотрен каждый из методов повышения стойкости.

По оценкам некоторых зарубежных фирм в 70-х гг. XX века целесообразным являлось использование бойков из малоуглеродистой стали с твердым покрытием или вставками из твердого сплава. В качестве примера можно привести авторское свидетельство [6], в котором предложена конструкция бойков из инструментальной стали с армированными вставками из твердосплавного материала в виде пластин на заходном и калибрующем участках. Целью данного изобретения является экономия твердосплавного материала. Авторы показывают, что износ стальных промежутков продолжается лишь после того, как до этого уровня изнаются торцы твердосплавных пластин. Затем цикл повторяется. Таким образом, данное решение позволяет поддерживать стойкость бойков не ниже наплавленных твердых сплавом по всей площади рабочей поверхности при

существенном сокращении необходимого количества твердого сплава. Однако обработка твердых сплавов является затруднительной и не во всех случаях приемлемой для предприятий. Их применение должно быть обосновано.

Аналогичный пример применения твердосплавных вставок для повышения эксплуатационной стойкости приведен в авторском свидетельстве [21], где предложена конструкция бойка, который имеет вставки на калибрующем участке в виде набора поочередно расположенных полуколец из материалов с соотношением твердостей которых находится в пределах $2 \dots 15$ (рисунок 1.16). То есть одно полукольцо изготавливается с высокой твердостью, а последующее — с меньшей. Отношение ширины каждого полукольца к его внутреннему диаметру находится в пределах $0,1 \dots 0,5$.

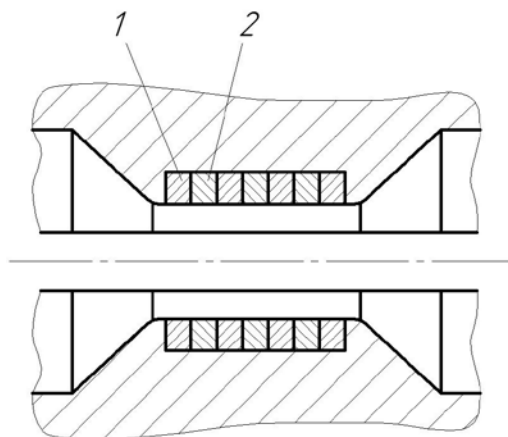


Рисунок 1.16 – Конструкция бойков со вставками полуколец на калибрующем участке: 1 – полукольцо с высокой твердостью, 2 – полукольцо с меньшей твердостью

В момент обжатия вставки с низкой твердостью начинают деформироваться, что положительно сказывается на схеме напряженно-деформированного состояния. Это дает возможность устранить поверхностные дефекты заготовки типа сетки трещин и реализовать интенсивную проработку центральной области заготовки. При этом большее соотношение твердостей материала рабочей поверхности бойков способствует более благоприятному напряженно-деформированному состоянию заготовки. Однако авторами отмечено, что соотношение твердости полуколец более 15 и менее 2 приводит к

снижению стойкости и работоспособности инструмента, так как благоприятное воздействие микро- и макронеровностей профиля бойков на схему напряженно-деформированного состояния не проявляется. При обработке пластичных материалов применяются вставки в виде полуколец с соотношением твердостей до 15. Например, для обработки ниобия или тантала рекомендованы такие материалы полуколец, как ВК-20 и сталь 45 с соотношением твердости около 12. При обжати вольфрамовых сплавов принимаются материалы ВК-20 и ВНЖ-4-6 с отношением твердости 5. Предложенная авторами конструкция инструмента обеспечивает повышение качества изделий и производительности процесса, а рациональный подбор твердости материалов полуколец повышает стойкость бойков.

В авторском свидетельстве [15] рассматривается способ упрочнения рабочей поверхности бойков за счет сохранения в процессе эксплуатации наклепанного слоя. Такое решение позволяет в значительной мере снизить трудоемкость их изготовления с одновременным увеличением стойкости (рисунок 1.17). На рабочих гранях бойков 1 выполняются выступы 2 в местах контакта с заготовкой. Высота выступов составляет $0,2 \dots 0,4$ мм. Наклеп выступов осуществляется непосредственно в процессе обработки заготовок.

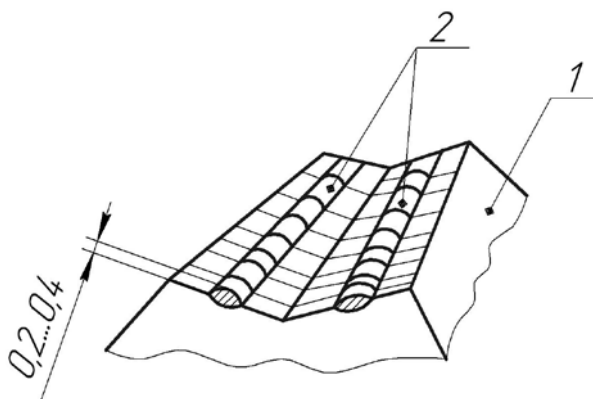


Рисунок 1.17 – Конструкция обжимного бойка с продольными выступами:

1 – боек; 2 – продольные выступы

В результате воздействия ударных и истирающих нагрузок выступы истираются и расклепываются. Однако слой металла ниже уровня граней, наклепанный в процессековки, остается защищенным. Авторами отмечено, что

высота выступов более 0,4 мм на заготовке после обжатия остаются вмятины, а при высоте менее 0,2 мм выступ не оказывает влияния на износостойкость бойка.

В результате проведенного эксперимента авторами доказана высокая эффективность данного решения. За счет сохранения наклепанного слоя с помощью выступов удалось повысить стойкость инструмента в 3 раза.

Помимо применения твердосплавных элементов в конструкциях бойков, ряд авторских свидетельств [16, 18, 19] доказывает возможность повышения износостойкости путем изменения конфигурации профиля ручья обжимного бойка. Например, занижение одной рабочей части бойка (калибрующего участка и прилегающего заходного конуса) относительно другой позволяет продлить срок службы бойков и сократить расход инструментальных сталей на их изготовление [16]. На рисунке 1.18 представлен эскиз конструктивного решения.

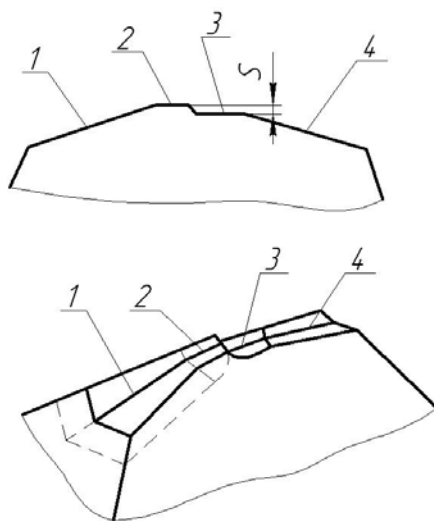


Рисунок 1.18 – Боек с одной заниженной рабочей частью:

1, 2 – завышенные заходный и калибрующий участки соответственно;

3, 4 – заниженные калибрующий и заходный участки

При этом величина понижения S должна быть такой, чтобы в процессе обжатия заниженная часть бойка не соприкасалась с заготовкой. Завышенный профиль 1, 2 после его износа и восстановления шлифованием становится ниже бывшего заниженного 3, 4. Обжатие продолжают ставшим завышенным профилем, до этого не участвовавшим в работе. Далее циклы восстановления и работы повторяются до установленного количества ремонта рабочего профиля

ручья бойка. Преимуществом данного способа является сравнительная простота восстановления рабочей части бойка путем перешлифования его профиля.

Еще один способ повышения эксплуатационной стойкости бойков описывается в авторском свидетельстве [18]. Особенностью данного решения является то, что рабочая поверхность калибрующего участка по всей длине в поперечном сечении выполняется в виде участка логарифмической спирали, полюс которой совпадает с осью инструмента (рисунок 1.19). Расстояние от крайней точки кривой до оси инструмента в направлении вращения деформируемой заготовки выполняется меньшим, чем расстояние от другой крайней точки участка спирали до оси инструмента.

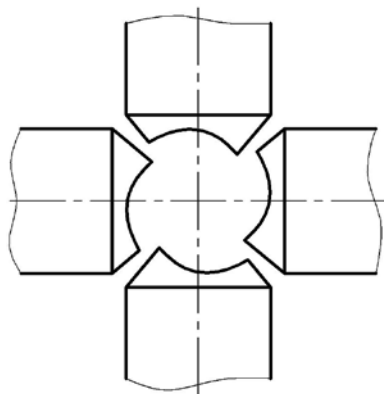


Рисунок 1.19 – Боек с калибрующей частью, выполненной в виде логарифмической спирали в поперечном сечении

В процессе обжатия заготовка деформируется начальным участком логарифмической спирали, расположенным ближе к оси заготовки. Однако после кантовок заготовки между обжатиями на начальный участок спирали приходится часть заготовки, образовавшаяся вследствие вытеснения металла в межбойковое пространство. В процессе работы начальный участок спирали подвергается большому износу в сравнении с конечным. Такое расположение рабочих поверхностей инструмента позволяет компенсировать интенсивный износ калибрующей части бойка в направлении кантовок заготовки.

В авторском свидетельстве [19] предложен профиль бойка, заходный участок которого выполнен в виде тора, образованный вращением дуг

окружности R вокруг продольной оси (рисунок 1.20). При этом величина радиуса определяется соотношением:

$$R = \frac{D_3 - D_k}{2 \left(1 - \cos \frac{\alpha_{\max}}{2} \right)},$$

где D_3 и D_k – наибольший диаметр заходного и диаметр калибрующего участков соответственно;

α_{\max} – максимальный угол заходного конуса.

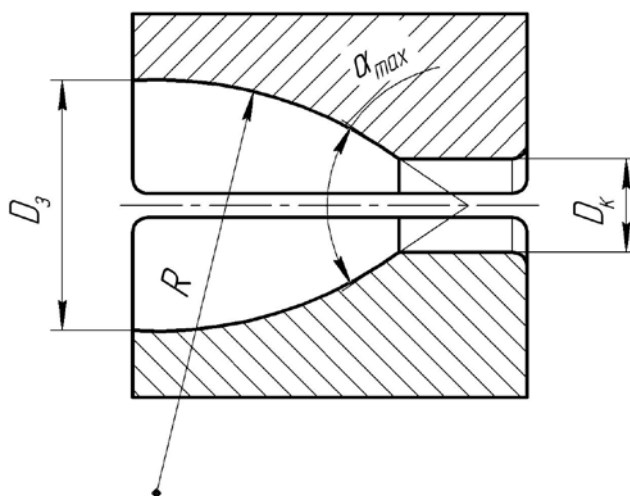


Рисунок 1.20 – Профиль бойка с торообразным заходным участком

Уменьшение диаметра заготовки от D_3 до D_k осуществляется за несколько рабочих ходов. В зону с максимальным углом α_{\max} , где неравномерность деформации максимальная, заготовка поступает уже предварительно обжатой и имеет форму тора предыдущего участка. Это приводит к более равномерному распределению деформаций в сечении заготовки, что повышает качество получаемой поковки. В таких бойках исключено дискретное изменение углов заходного конуса, следовательно отсутствуют концентраторы напряжений, которыми обычно являются места сопряжений конусов с калибрующим участком, и тем самым повышается стойкость бойков.

Стоит отметить, что в методах повышения износостойкости путем изменения профиля ручья бойка, описанных в авторских свидетельствах [16, 18,

19], недостаточное внимание уделено выбору профиля заходного участка инструмента.

Увеличение срока службы обжимных бойков путем улучшения напряженно-деформированного состояния инструмента в процессе обработки описано в авторском свидетельстве [17], где предложена конструкция бойков с установленным стержнем (рисунок 1.21). Посадка стержня, изготовленного из материала бойка, выполняется с натягом и создает предварительное напряженное состояние с интенсивностью напряжений q , составляющих 20-30% предела текучести материала бойка. В процессе деформирования усилие обжатия P воспринимается двумя гранями и раскладывается на них одинаково на силы P_1 и P_2 . Усилия P , P_1 и P_2 вызывают в теле бойка напряжения сжатия, однако предварительно созданное напряженное состояние q , обратное по знаку сжимающим усилиям, снижает их действие. В результате возрастает количество рабочих циклов инструмента до его износа.

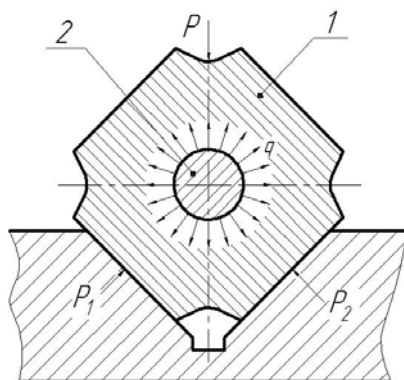


Рисунок 1.21 – Конструкция бойка с запрессованным стержнем:

1 – боек, 2 – стержень; q – предварительное напряжение натяга,

P , P_1 и P_2 – усилияковки

Величина интенсивности напряженного состояния от получаемого натяга обеспечивает компенсацию опасных зон концентрации сжимающих напряжений, возникающих в процессе обжатия. Авторами доказано, что предлагаемая конструкция бойка обеспечивает более высокую его долговечность.

Недостатком обжимных бойков, выполненных в виде многогранной призмы с четным количеством граней, рабочих профилей и установочных поверхностей

является их низкая стойкость вследствие высоких контактных давлений на установочных поверхностях (рисунок 1.22а).

С целью устранения данного недостатка авторским свидетельством [20] предложено конструктивное решение. Каждые две смежные грани инструмента выполняются установочными и располагаются под углом к направлению приложения усилия обжатия. Рабочие профили располагаются в местах пересечения смежных граней, а усилие деформирования раскладывается на две грани одинаково (рисунок 1.22б). Таким образом, предлагаемая конструкция бойков позволяет снизить контактные давления на установочные поверхности, что ведет к повышению стойкости бойков и экономии дорогостоящего материала.

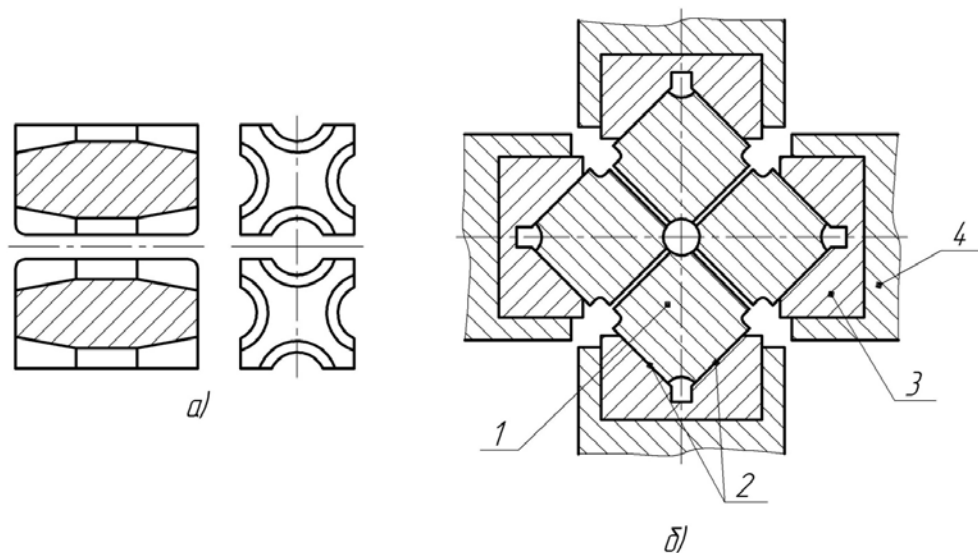


Рисунок 1.22 – Призматические обжимные бойки: а) базовое исполнение; б) бойки с двумя установочными поверхностями и рабочим профилем в местах пересечения смежных граней [20], 1 – боек; 2 – установочные поверхности; 3 – призма; 4 – подошва ползуна

Однако в данных авторских свидетельствах при описании конструкций бойков не учитываются такие параметры, как твердость инструментального и обрабатываемого материала, а также параметры шероховатости рабочего профиля бойков.

При изготовлении инструмента большое значение имеют механические свойства и однородность материала бойка. В авторском свидетельстве [9]

указывается, что известные способыковки заготовок для инструмента из легированной стали методом расковки квадратной исходной заготовки после каждого последующего кантования на 90° не обеспечивают получения минимальной карбидной неоднородности по сечению, что является основной причиной снижения стойкости инструмента.

Конструктивная форма бойков, использующихся для радиального обжатия, в некоторой степени подобна фильерам (волокам) для волочения. Различия заключаются в характере работы инструмента: радиально-обжимные бойки деформируют заготовку ударами, а волокни — путем приложения силы к протягиваемому металлу металла через отверстие в волоке.

Волочильный канал состоит из пяти зон: входной I, обжимающей II, переходной III, калибрующей IV и выходной V (рисунок 1.23).

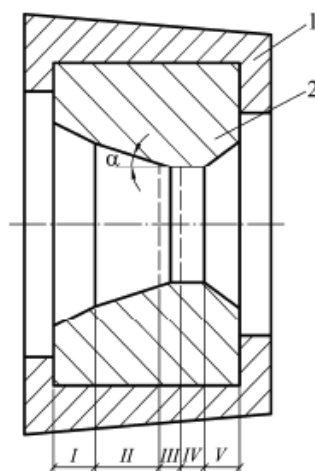


Рисунок 1.23 – Волока в обойме: 1 – обойма, 2 – волока;

I–V – зоны волоки; α – угол волоки [88]

Из этих пяти зон в контакте с деформируемым металлом в процессе волочения находятся только три: обжимающая, переходная и калибрующая. Поэтому на силу и напряжение волочения оказывает влияние продольный профиль только этих зон, образующих зону деформации.

Опыт производства показывает, что на силу и напряжение волочения влияет угол наклона образующей обжимающей зоны к оси канала волоки, или угол волоки α . Увеличение угла α приводит к уменьшению контактной поверхности

металла с волокой, что снижает силу трения и силу волочения, однако повышается давление металла на поверхность волочильного канала, выжимается смазка из деформационной зоны, растет коэффициент трения и усилие волочения. При малых значениях α увеличивается контактная поверхность металла с волокой, т.е. растет сила трения, но снижается степень деформации. Таким образом, наличие двух групп факторов, оказывающих противоположное влияние на силу волочения, и обуславливает существование зоны оптимальных углов, которая обычно находится в интервале от 5 до 18° [88].

В процессе эксплуатации волочильный инструмент подвержен нескольким типам износа обжимающей зоны: образование кольца износа, полос царапин, трещин, сколов [89-91]. Следовательно, повышение износостойкости волок является актуальной проблемой, решение которой способствует повышению производительности и снижению затрат на инструмент [92-93]. В настоящее время существует множество методов повышения износостойкости инструмента: термическая обработка [94-95]; упрочнение механической и термомеханической обработкой; вибрационная обработка; термовибрационная и дробеструйная обработка; нанесение износостойкого покрытия; воздействие высокоэнергетическими источниками; профилирование заходного участка волок; повышение равномерности деформаций путем увеличения площади контакта заготовки с профилем волок; воздействие ультразвуком и т.д.

Применению в качестве материала волок твердых сплавов и сверхтвердых материалов, а также их термической обработке посвящено большое число работ [91-96]. Статистика гласит, что в зависимости от протягиваемого материала, способа протяжки и условий волочения твердосплавные волокна могут дать в 30...200 раз большую производительность, чем обычные волокна [96]. В статье [97] проведено исследование влияния профиля ручья волок на механико-прочностные свойства получаемой проволоки и характер очага деформаций, однако не рассматривался вопрос влияния профиля обжимающей зоны на энергосиловые параметры процесса. Профиль деформирующей зоны волок в значительной степени определяет качество получаемой проволоки, стойкость

позволяющим снизить затрачиваемую силу деформирования и повысить стойкость инструмента.

1.4 Выводы по главе 1

1. Выполнен анализ существующих разработок в области конструктивных элементов радиально-обжимных бойков, определено влияние геометрических элементов на показатели процесса радиального обжатия. Исходя из результатов выполненного обзора выявлено, что непосредственно на процесс радиального обжатия оказывают влияние две группы факторов: режимы обработки и геометрические характеристики обжимного инструмента. Следовательно, при разработке математической модели необходимо учитывать влияние геометрических элементов бойков.

2. Известные работы по повышению эффективности процесса радиального обжатия направлены на повышение производительности и долговечности применяемого инструмента, улучшение качества получаемых заготовок и снижения энергозатрат процесса деформирования.

3. В настоящее время отсутствует единая методика назначения геометрических элементов обжимных бойков для реализации технологического процесса обжатия с наибольшей эффективностью.

4. Анализ параметров технологического процесса обжатия показывает, что геометрические элементы бойков оказывают значительное влияние на характер протекания процесса и энергосиловые параметры радиального обжатия. В настоящее время активно ведутся работы в области интенсификации процессов радиального обжатия и создания более износостойких инструментов на основе исследования влияния геометрических характеристик бойков на параметры процесса. Данные направления предполагают модернизацию существующих конструкций обжимных бойков путем профилирования заходного участка и освоение перспективных методов изготовления бойков с твердосплавными пластинами.

5. Среди всех геометрических элементов бойков наибольшее влияние на процесс деформирования и его энергосиловые параметры оказывает угол заходного конуса бойка α .

В результате проведенного аналитического обзора литературы сформулирована цель исследования и определены задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

Целью работы является повышение эффективности технологии радиального обжатия и качества изделий путем сокращения энергозатрат процесса за счет оптимизации формы заходного участка деформирующего инструмента.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ существующих разработок в области конструктивных элементов радиально-обжимных бойков, определить влияние геометрических элементов на показатели процесса радиального обжатия.

2. Провести теоретическое исследование радиального обжатия, предложить математическую модель процесса и на основе ее анализа:

- разработать методику расчета энергосиловых параметров при деформировании бойками с различной геометрией заходного конуса;
- установить влияние угла заходного конуса бойка на энергосиловые параметры процесса обжатия.

3. Выполнить экспериментальные исследования, направленные на проверку полученных результатов математического моделирования и оценки эффективности применения бойков с переменным углом заходного конуса.

4. Разработать практические рекомендации по повышению эффективности технологий радиального обжатия путем применения бойков с переменным углом заходного конуса.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАДИАЛЬНОГО ОБЖАТИЯ

2.1 Физическая модель процесса радиального обжатия

Радиальное обжатие осуществляется по схеме всестороннего неравномерного сжатия обрабатываемого материала. В процессе деформирования на заготовку действуют следующие силы (рисунок 2.1) [1]:

- 1) сила деформирования P со стороны обжимных бойков, $кН$;
- 2) сила подачи на ход P_s со стороны зажимной головки, $кН$;
- 3) сила сопротивления зажатию заготовки $P_{сопр}$, $кН$.

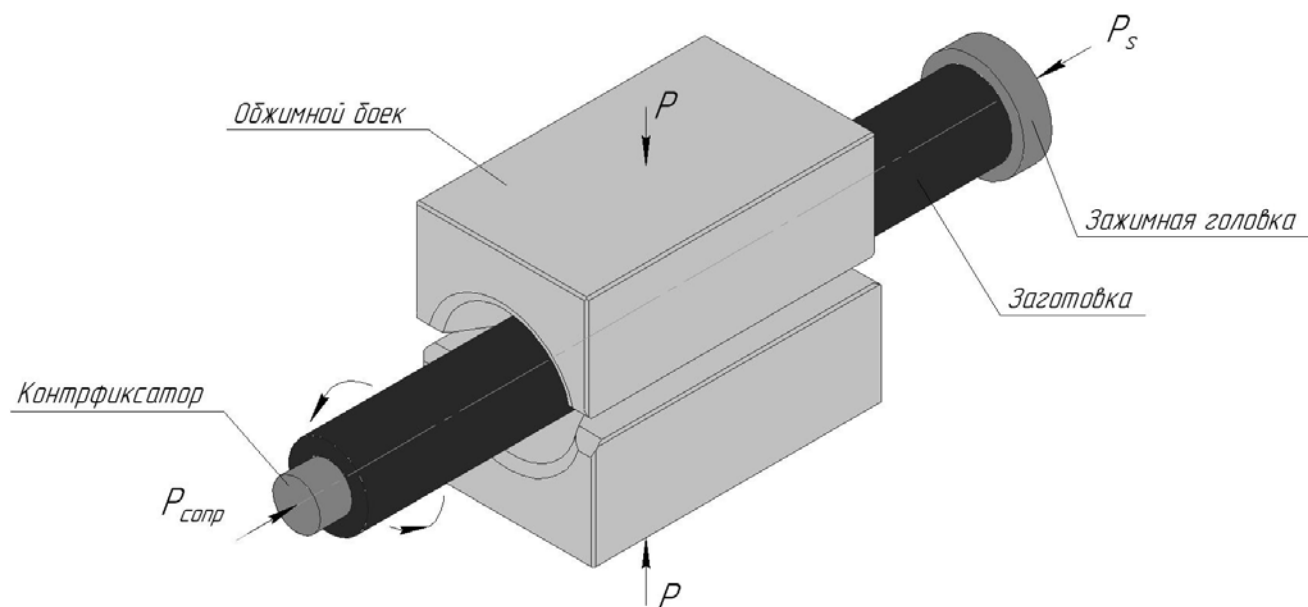


Рисунок 2.1 – Схема приложения сил при радиальном обжатии [104]

Из представленного рисунка 2.1 очевидно, что радиальное обжатие можно рассматривать как разновидность комплексного локального нагружения очага деформации (КЛН-деформирования): заготовка глобально нагружена силой подачи на ход P_s и силой сопротивления зажатию заготовки $P_{сопр}$, а локально – силой деформирования P со стороны обжимных бойков (рисунок 2.2). Очаг пластического деформирования лежит между обжимными бойками и уже

упрочнённым участком (объем металла прошел деформацию), в совокупности с еще не деформированной частью заготовки.

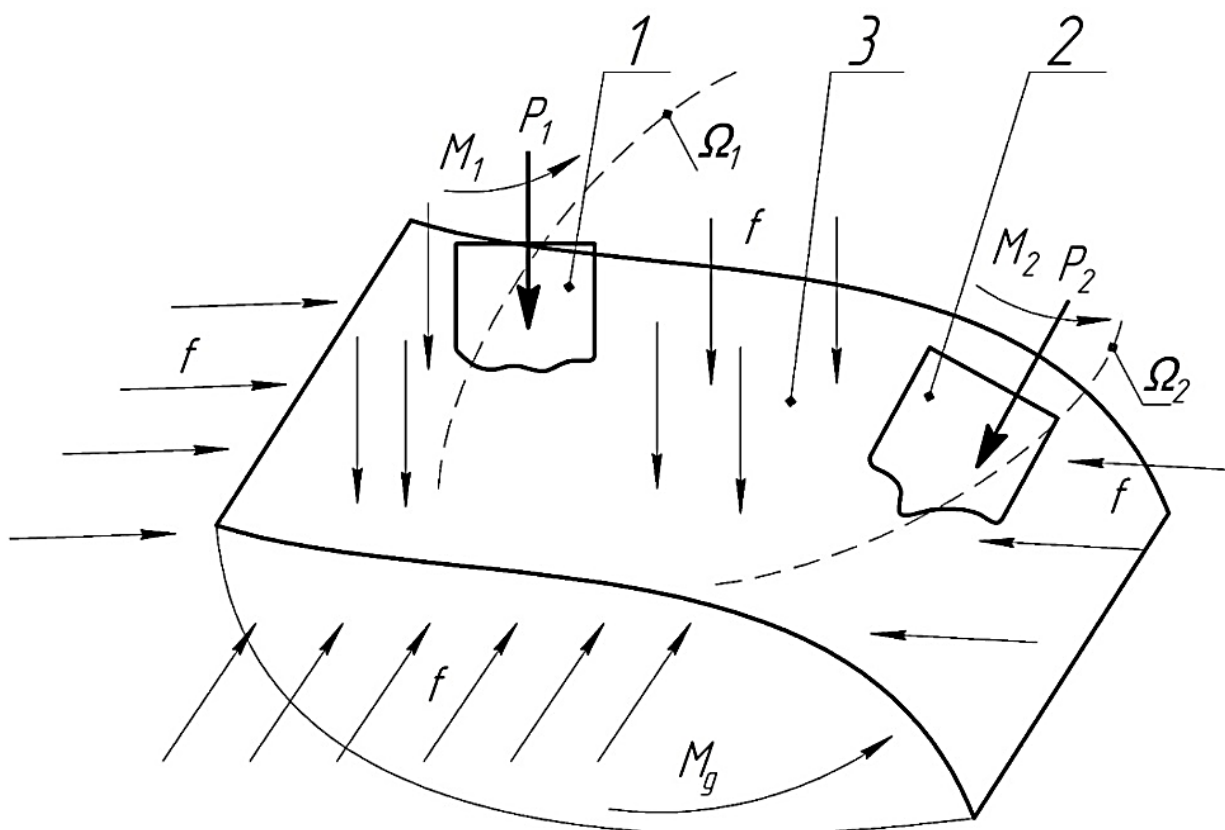


Рисунок 2.2 – Общая схема процессов КЛН-деформирования [104]:

1, 2 – комплекс инструментов локального деформирования; 3 – заготовка;
 P_i , M_i – силы и моменты на инструментах; f – напряжения от сил, создающих глобальное нагружение; M_g – момент, приложенный к заготовке в процессе обработки; Ω_i – траектории движения инструментов

Радиальное обжатие характеризуется перемещением небольших объемов металла заготовки относительно рабочей поверхности бойков на сравнительно малых участках. Основная работа формообразования происходит в заходном конусе бойка. Деформация имеет неравномерное распределение по длине заходного участка (рисунок 2.3).

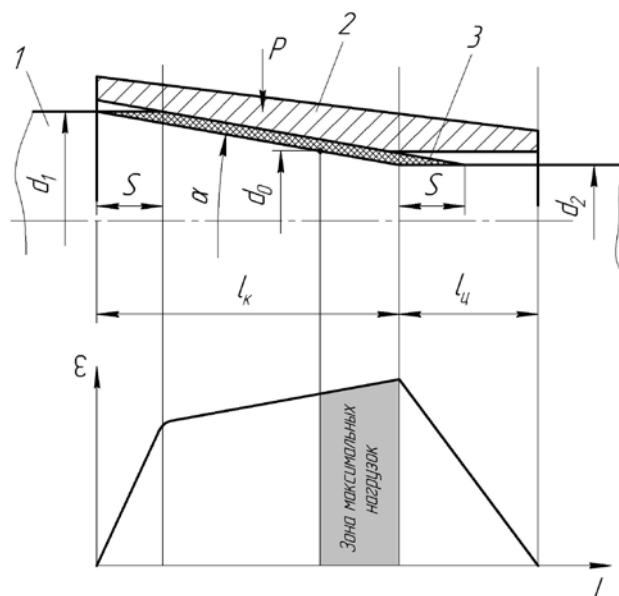


Рисунок 2.3 – Изменение удельной степени деформации ε по длине очага формоизменения L [1]: 1 – заготовка; 2 – боек; 3 – смещаемый металл, d_1 – начальный диаметр заготовки; d_2 – конечный диаметр; α – угол заходного конуса бойка; S – шаг подачи; d_0 – диаметр нейтральной поверхности; l_k – длина заходного конуса; l_d – длина калибрующего участка; L – общая длина очага формоизменения

В очаге деформации металл течет в обе стороны от нейтральной поверхности d_0 — границы раздела течения металла в сторону сужения и расширения конуса. При этом максимальные нагрузки наблюдаются в конечной точке заходного конуса бойка — на участке сопряжения конического и цилиндрического участка [1, 2].

Анализ работ показал, что одним из недостатков базовой конструкции обжимных бойков, в которых рабочая часть выполнена в форме усеченного конуса с определенным углом (рис. 2.4а), является возрастание неравномерности деформаций обрабатываемого материала по мере приближения к калибрующему участку, что приводит к повышенной нагрузке и износу конечного участка заходной части инструмента [1, 19]. Предложенный в авторском свидетельстве [23] профиль заходной части бойка, который разбит на несколько усеченных конусов (рис. 2.4б), позволяет в процессе обжатия более равномерно

распределить объемы деформируемого металла на всей длине входной зоны. Однако недостатком данной конструкции является дискретное изменение углов конусности, что приводит к возникновению концентраторов напряжений, которыми являются места сопряжений конусов с разными углами, и повышенному износу мест сопряжений углов в процессе эксплуатации. Для устранения этого недостатка в авторском свидетельстве [19] предложена конструкции бойков, профиль заходного участка которых выполнен в виде части тора и образован вращением дуг окружности вокруг оси рабочей полости. (рис. 2.4в).

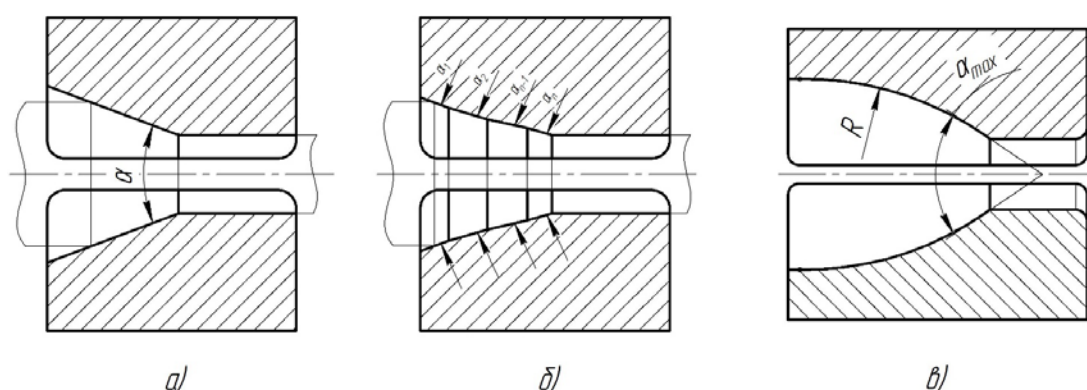


Рисунок 2.4 – Радиально-обжимные бойки:

- а) базовое исполнение с постоянным углом заходного конуса α ;
- б) с плавно увеличивающимися углами конусности, где $\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_{n-1} < \alpha_n$ [23];
- в) с торообразным профилем заходного конуса [19]

В отличие от бойков со стандартным исполнением рабочей части, где угол заходного конуса постоянный на всей длине ($\alpha = \text{const}$), в предложенных бойках угол заходного конуса изменяется от нуля в начале рабочего участка до α_{\max} в конце, т.е. угол α является переменным на длине очага формоизменения:

$$\alpha \in [0, \alpha_{\max}] \quad (2.1)$$

В зону с максимальным углом α_{\max} заготовка поступает предварительно деформированной, что дает более равномерное распределение деформаций в объеме металла на участке заходного конуса [19, 23]. Из представленного конструктивного решения можно сделать вывод, что плавное увеличение угла заходного конуса позволит [1, 28, 29]:

1. Повысить качество поковок за счет получения большей равномерности деформаций в объеме деформируемого металла.
2. Повысить стойкость обжимного бойка путем устранения концентраторов напряжений, которыми являются места сопряжения конусов с разными углами.
3. Уменьшить силу и требуемую мощность деформирования за счет более равномерного протекания процесса деформирования, т.е. сократить энергозатраты процесса.

Однако конструкция бойков, у которых начальный угол заходного участка равен нулю ($\alpha_{min} = 0$), нецелесообразно использовать для деформирования различных материалов с твердостью $HB > 163$ [1], т.к. это приводит к снижению стойкости инструмента и ухудшению условий захвата заготовки. Использование бойков, угол заходного конуса которых изменяется от минимального значения в начале профиля ручья до максимального в конце (т.е. имеющих выпуклый профиль деформирующей зоны [99]), позволит устранить данный недостаток и деформировать заготовки из конструкционных сталей и цветных металлов с твердостью $HB > 163$ [1]. В таких бойках с выпуклым профилем угол α находится в диапазоне:

$$\alpha \in [\alpha_{min}, \alpha_{max}] \quad (2.2)$$

Под радиально-обжимным бойком с переменным углом заходного конуса условимся понимать боек, образующая заходного участка которого выполнена в виде кривой с изменяющимся углом α в каждой точке профиля. У таких бойков профиль может выполняться как выпуклым, так и вогнутым.

Исходя из описанных выше производственных рекомендаций, в данной работе будут рассматриваться радиально-обжимные бойки с переменным углом заходного конуса выпуклого профиля (рисунок 2.5) как наиболее рациональные с точки зрения условий захвата заготовки. В таких бойках заходная часть имеет выпуклую форму и выполнена в виде плавной кривой с постепенным увеличением угла от минимального α_{min} в начале конусного участка до максимального α_{max} в конце.

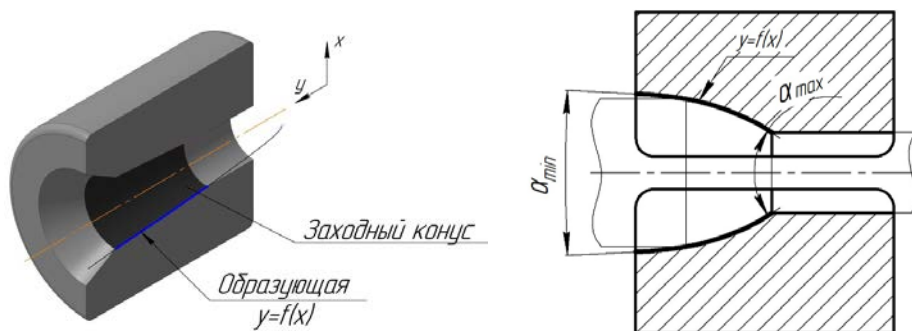


Рисунок 2.5 – Трехмерная модель и эскиз радиально-обжимного бойка с переменным углом заходного конуса выпуклого профиля

Однако при проектировании данных бойков не уделяется достаточного внимания выбору геометрии входной зоны, а также методике определения энергосиловых параметров при деформировании заготовок такими бойками. Расчет энергосиловых параметров по базовой методике, приведенной в [1], делает результаты справедливыми только при определенном значении угла α в конкретной точке очага формообразования без возможности исследования закономерностей изменения по времени и длине очага формоизменения.

Далее в работе будет проведено исследование процесса радиального обжатия бойками с переменным углом заходного конуса.

2.2 Выбор рациональной формы заходного участка обжимных бойков

При проектировании бойков желательно принимать такую форму поверхности заходного участка, которая имела бы плавное изменение диаметра и могла быть выражена простым математическим выражением.

В базовой конструкции обжимного инструмента образующая заходного конуса идет под определенным углом, который не изменяется в каждой точке профиля ручья, следовательно в декартовой системе координат ее можно описать линейной функцией вида $y = kx + b$ (рисунок 2.6), где ось Ox совпадает с осью обжимного бойка, а ось Oy перпендикулярна оси Ox .

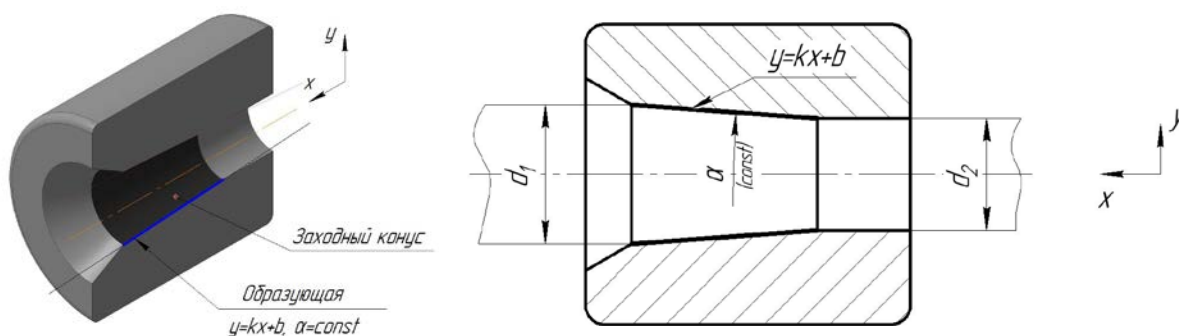


Рисунок 2.6 – Трехмерная модель и эскиз радиально-обжимного бойка базового исполнения с постоянным углом заходного конуса

Форма заходного участка инструмента играет ключевую роль в процессе формообразования, от которой зависит не только качество получаемой поверхности и производительность, но и срок службы самого инструмента. Проведенный анализ литературы [29, 32, 35] показал, что определение профиля является наиболее трудоемким и ответственным этапом проектирования инструментов.

Сложность проблемы обусловила большое многообразие существующих методов профилирования и выбора рациональной формы инструмента. Например, для увеличения срока службы конических роликоподшипников в условиях перекоса или тяжёлых нагрузках компания NTN Corporation (Франция и Япония) предложила оптимизированный логарифмический профиль ролика [29]. Изготовление роликов с такой конфигурацией гарантирует более равномерный контакт по всей рабочей поверхности дорожки качения и позволяет предотвратить увеличение напряжений на концах роликов. Профиль, описываемый функцией натурального логарифма, также используется при разработке современных конструкций выравнивающих инструментов [30]. Это расширяет технологические возможности инструмента и увеличивает номенклатуру обрабатываемых деталей из твердых и мягких материалов [30, 31].

Для холодной прокатки труб в авторском свидетельстве [32] предложен профиль гребня ручья вала и оправки, который выполняется по параболе, которая задана математической функцией. Это позволяет повысить точность

прокатки, качество труб и снизить износ инструмента за счет снижения вертикальных и осевых нагрузок. Однако отсутствие калибрующего участка на оправке и валках и сложность настройки прокатного стана по одному сечению, соответствующему геометрическим размерам готовой трубы, не во всех случаях обеспечивает требуемую точность прокатки (в частности, при изготовлении калиброванного проката). С целью устранения данного недостатка в авторском свидетельстве [33] запатентована форма обжимного валка и оправки в виде кривой, являющейся геометрическим местом узловых точек различных сплайн-функций. При этом обжимной и калибрующий участок выполняются в виде единой кривой. Данное изобретение обеспечивает изготовление труб высокой точности со стабильными механическими свойствами.

В настоящее время применение гиперболоидных инструментов для обработки выпуклых поверхностей является довольно перспективным направлением. В частности, в работах [35-36] предложены конструкции гиперболоидных фрез для фрезерования железнодорожных рельсов. Также фрезы с гиперболическим профилем используются при нарезании зубчатых колес [36-37].

Таким образом, исходя из опыта современного производства, можно сделать вывод, что с целью улучшения контактных характеристик тел качения в обоймах подшипников применяется логарифмический профиль, а параболический и логарифмический — для изготовления специального инструмента, назначение которого заключается в увеличении стойкости.

В радиально-обжимных бойках заходный конус является тем элементом, в котором происходит основное деформирование заготовки, то есть начальный диаметр d_1 изменяется на конечный d_2 . Геометрия данного участка имеет основополагающее значение, которое во многом определяет энергосиловые параметры. Комплект бойков формируют закрытый канал, через который проходит заготовка круглого поперечного сечения в процессе уменьшения своего диаметра. Данный участок в общем виде представляет поверхность вращения, при этом ось вращения совпадает с осью заготовки (рисунки 2.7).

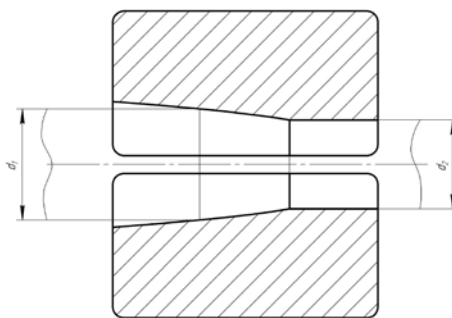


Рисунок 2.7 –Общая схема процесса формообразования

Вопрос выбора геометрии инструмента можно рассмотреть как задачу, то есть определить некоторые граничные условия, поставить условие минимума или максимума и по итогу определить вид кривой [105]. Можно использовать известные решения, как это показано в [101], где поставлено условие по минимизации площади пятна контакта, при заданной глубине внедрения индентора в процессе упрочняющего комплексного локального деформирования. Данная постановка эквивалентна решению следующей известной задачи: какая поверхность вращения, проходящая через две точки $P_1(x_1; y_1)$ и $P_2(x_2; y_2)$ в плоскости xOy , где $x_1 < x_2$, образованная вращением кривой $y=f(x)$ вокруг оси Ox , имеет наименьшую возможную площадь (рисунок 2.8). Последнее известно, как проблема Плато, а решением является поверхность, образованная вращением цепной линии, называемая катеноидом.

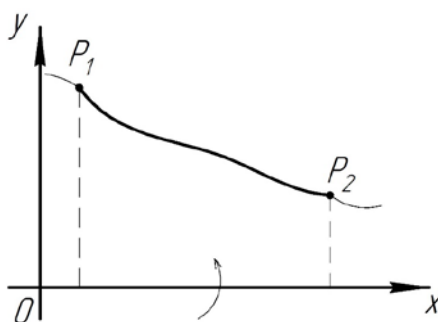


Рисунок 2.8 – Представление геометрии канала, как произвольной кривой, вращающейся вокруг оси Ox , которая совпадает с осью заготовки [105]

Для упрощения перейдем к рассмотрению кривой (ее участка), которая, вращаясь вокруг оси заготовки, формирует геометрию рассматриваемого участка (рисунок 2.8) подобно тому, как делали ранее в [101].

Применим иной подход и рассмотрим движение заготовки по указанному участку. Пусть заготовка, имеющая круглое поперечное сечение проходит рассматриваемый участок канала инструмента, при этом его геометрия неизвестна. Зафиксируем некоторое начальное положение заготовки — выделим в нем определенное сечение, в плоской постановке проведем через него прямую. Предположим, что каждое сечение остаётся плоским и параллельным начальному при движении заготовки по каналу. Расстояние от начального до любого сечения в канале обозначим как PP' , при этом точка P это точка касания сечения с каналом, а точка P' — пересечение перпендикуляра, опущенного из точки P с прямой проходящей через начальное сечение. Так как инструмент неподвижен то свяжем его с некоторой точкой F (эта точка может и не принадлежать телу инструмента). Обратим внимание, что начальное сечение, положение которого определяется прямой, где лежат все точки P' выбрано произвольно, поэтому положение точки F , относительно рассматриваемой линии может быть любым. Все сечения, как принято выше, до вхождения в канал, во время деформирования и после выхода заготовки параллельны друг другу. Расстояние от точки P , характеризующей положение сечения до фиксированной точки F , связанной с инструментом, есть отрезок PF (рисунок 2.9).

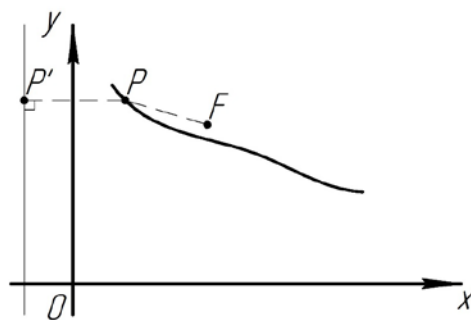


Рисунок 2.9 – Задача геометрии канала [105]

Точка P определяется геометрией канала — отрезком PF , который подобно вектору может поворачиваться и менять длину, а ее положение зависит от пройденного расстояния относительно начального положения — отрезком PP' (он при движении точки по P по каналу меняет свое положение и величину оставаясь параллельным самому себе в каждом из положений). Движение точки P , которое

можно описать, как изменение отрезков PP' и PF , задается геометрией канала, а с другой стороны и определяет её.

Таким образом, имея начальное положение сечения заготовки, точки на нем P' и инструмент с заданной фиксированной точкой F , изменяя величину отрезков PP' и PF , полностью определим геометрию канала. Так как отрезкам принадлежит общая точка P , то зададим связь их друг другом:

$$|PF| = f(|P'P|) \quad (2.3)$$

Положим зависимость (2.3) как линейную, что является наиболее простым вариантом, тогда (2.3) примет вид:

$$|PF| = e \cdot |P'P| \quad (2.4)$$

То есть отношение величины отрезков, определяющих положение точки P , есть величина постоянная, при перемещении точки по каналу. Выражение (2.4) определит геометрию канала. Нетрудно заметить, что (2.4) представляет собой описание невырожденного конического сечения через величину эксцентриситета e [102]. Таким образом, прямая, проходящая через начальное сечение есть директриса, а точка F — фокус конического сечения. Выражение (2.4), путем введения декартовой системы координат, параметра p , который определяется, как $p = e \cdot |P'F|$ (фокальный параметр) и соответствующего преобразования канонического уравнения кривой второго порядка [103] может быть представлено как:

$$y^2 = 2 \cdot p \cdot x - (1 - e^2) \cdot x^2 \quad (2.5)$$

В представлении (2.5) кривая проходит через начало системы координат, а ось абсцисс является осью симметрии. Так как $p \neq 0$ и $e \neq 0$, а $e > 0$, то наиболее простыми вариантами выражение (2.5) являются следующие, при $e = 1$:

$$y^2 = 2 \cdot p \cdot x \quad (2.6)$$

И при $e = \sqrt{2}$:

$$y^2 = 2 \cdot p \cdot x + x^2 \quad (2.7)$$

Уравнение (2.6) — это каноническое уравнение параболы (рисунок 2.10а). Если (2.7) представить как $y^2 + p^2 = p^2 + 2 \cdot p \cdot x + x^2$, далее $y^2 + p^2 = (p + x)^2$ и сместимся по оси абсцисс на $-p$ (рисунок 2.10б), то получим:

$$\frac{x^2}{p^2} - \frac{y_H^2}{p^2} = 1 \quad (2.8)$$

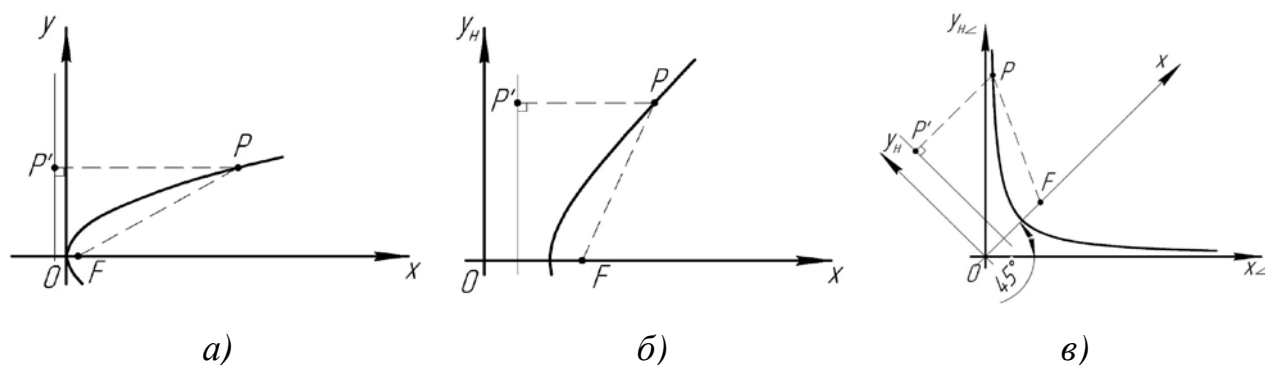


Рисунок 2.10 – Получаемые графики [105]: а) канонического уравнения параболы; б) уравнения равнобочной гиперболы; в) обратно пропорциональной зависимости

Выражение (2.8) — это уравнение равнобочной гиперболы, т.е. в некоторой системе координат в самом простом виде будем иметь:

$$y_{H\angle} = \frac{1}{x_{\angle}} \quad (2.9)$$

Выражение (2.9) справедливо для системы координат повернутой на 45° , т.е. следует рассматривать сечения, повернутые на этот угол в теле заготовки (рисунок 2.10в). Зависимость (2.9) представляет график обратно пропорциональной зависимости, т.е. диаметр при прохождении заготовки уменьшается в зависимости от пройденного расстояния.

Так как рассматриваемые процессы деформирования происходят с течением времени, то интерес представляет скорость изменения диаметра сечения. Если это проложить как еще один поход к выбору кривой, описывающий геометрию рассматриваемого участка инструмента при деформировании, то следует продифференцировать полученные выражения (2.6) и (2.9). При этом (2.6) проще

представить в более знакомом виде $y = ax^2$ и для простоты примем значение $a = 0,5$. Используя такой подход к выражению (2.6), получим:

$$y = x \quad (2.10)$$

А из выражения (2.9):

$$y = \frac{1}{x} \quad (2.11)$$

Зависимость (2.10) представляет прямую линию с наклоном 45° . Если в (2.6) варьировать параметр p , или в выражении $y = ax^2$, советующим образом выбирать a , то в объемном варианте получим описание канала как конусы с различными углами наклона, при соответствующих преобразованиях системы координат. Подобные варианты геометрии канала удовлетворительно изучены, поэтому больший интерес представляет исследование зависимостей (2.6), которая в объеме формирует параболоид вращения, а выражение (2.9) — гиперboloид вращения.

Таким образом, каналы в инструментах, деформирующих осесимметричные заготовки, могут быть представлены как частные и наиболее простые виды конических сечений. В простом виде это выражается как поверхности, полученные вращением кривых: $y = 0,5x^2$ и $y = \frac{1}{x}$. Такой подход задает однозначное соотношение между путем перемещения, а следовательно, и деформирования произвольного сечения и его положением относительно инструмента.

Выражение $y = \ln x$ формирует аналогичное соотношение, только между скоростью деформирования сечения и положением инструмента. Детальная проработка и практическое воплощение какого-либо производственного процесса с использованием инструмента, формирующего данную геометрию, представляет собой актуальную задачу. При этом в первую очередь, инженерный расчет энергосиловых параметров процесса также представляет собой проблему, решение которой позволит упростить процесс вычисления и изучить закономерности изменения параметров процесса по мере заполнения канала инструмента. Поэтому на основе обжимного инструмента базового исполнения

(рисунок 2.6) предлагаются конструкции бойков с переменным углом заходного конуса, образующая которых выполняется по математическим функциям, выраженным в декартовой системе координат (рисунок 2.11):

- квадратичной вида $y = 0,5x^2$;
- функции обратной пропорциональности $y = \frac{1}{x}$;
- функции натурального логарифма $y = \ln x$.

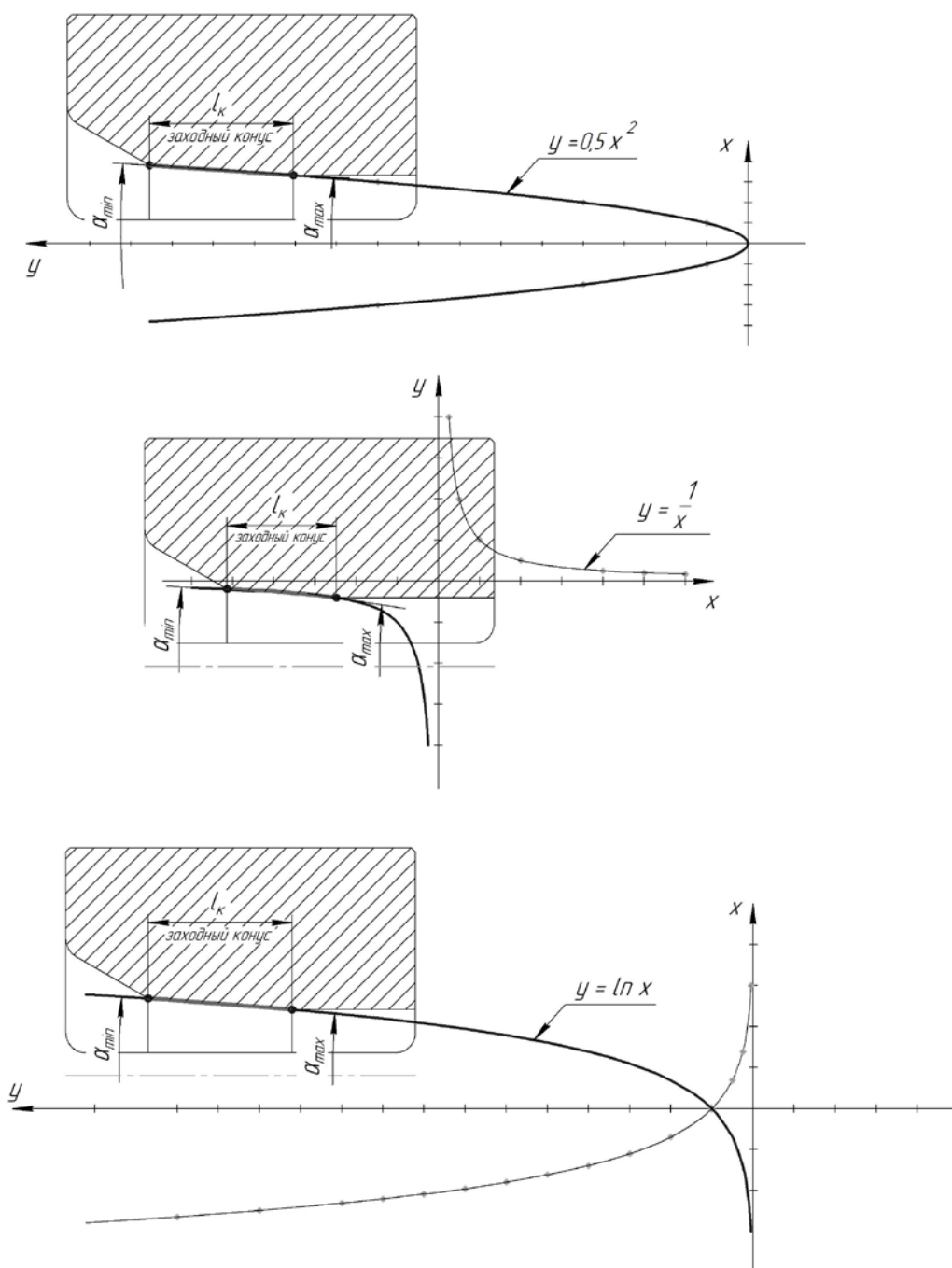


Рисунок 2.11 – Графики математических функций, используемые для получения выпуклого профиля заходного конуса, l_k – длина заходного участка

Представленные кривые данных функций обладают следующими преимуществами:

1. Относительная простота.

2. Возможность получения профиля механической обработкой на универсальном оборудовании: токарных станках с обработкой по копиру [38] или на станках с числовым программным управлением. С помощью современных систем автоматизированного производства (например, SprutCAM 2007) на основе созданной трехмерной модели составляется управляющая программа механической обработки детали.

3. Плавное изменение угла конусности.

Далее в работе для простоты понимания полученные профили будем называть параболический, гиперболический и логарифмический соответственно. Модели бойков, заходный участок которых изменяется по представленным функциям, приведены на рисунке 2.12.

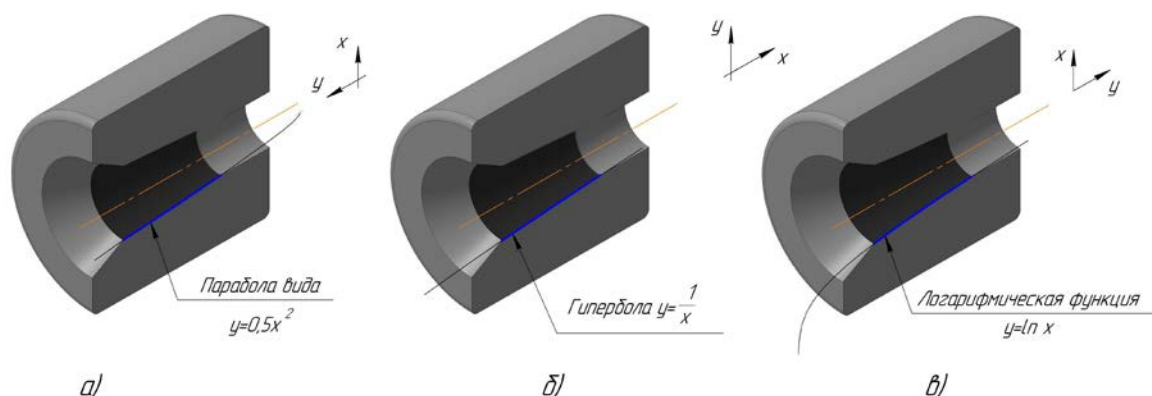


Рисунок 2.12 – Трехмерные модели бойков с переменным углом заходного конуса: а) с параболическим профилем; б) гиперболическим; в) логарифмическим

Выпуклый профиль получен вращением участка кривой (часть графика функции) вокруг оси бойка, причем в параболическом профиле ось ординат совпадает с осью бойка (рисунок 2.10). В работе минимальный угол заходного конуса α_{min} и длина участка l_k в данной работе будет выполняться одинаковым для всех профилей с целью дальнейшего сравнения показателей процесса. В таких бойках аналогично приведенным в авторском свидетельстве [19] угол заходного

конуса увеличивается по мере приближения к калибрующему участку. Изменение формы рабочей поверхности инструмента оказывает влияние на характер взаимодействия материала заготовки и инструмента, длину и площадь контакта, а также на распределение нагрузок в процессе обжатия [1, 2, 5, 19, 23].

2.3 Исследование процесса радиального обжатия по стадиям деформирования

В процессе радиального обжатия заготовка поступает в заходный конус обжимных бойков, где под действием внешних сжимающих сил бойки оказывают давление на заготовку и производят ее деформирование. При этом заходный участок подвергается неравномерной нагрузке вследствие различной относительной степени деформации ε на длине очага формоизменения (рисунок 2.3) [1, 2, 77]. Неравномерное нагружение заходного конуса бойка обусловлено непостоянством объемов смещаемого металла по мере приближения заготовки к калибрующему участку.

Таким образом, учитывая характер протекания процесса, радиальное обжатие можно разделить на три стадии, которые различаются относительной степенью деформации ε , объемом деформируемого металла V , контактными характеристиками инструмента с заготовкой, а также особенностями распределения силовых нагрузок на заходный конус бойка (рисунок 2.13):

1. Начальная стадия (рис. 2.13а), когда заготовка начинает поступать в заходный конус бойков и до ее входа в калибрующий участок. По мере прохождения заготовки в заходный участок бойка длина и площадь контакта с рабочим профилем бойка $L_{\text{конт. нач}}$ и $S_{\text{конт. нач}}$ соответственно, степень деформации ε , абсолютное обжатие заготовки Δd и объем деформируемого металла $V_{\text{ст. нач}}$ изменяются от нуля в начальный момент стадии до максимального значения в конечной точке заходного участка:

$$L_{\text{конт. нач}} = 0 \dots L_{\text{конт. max}}$$

$$S_{\text{конт. нач}} = 0 \dots S_{\text{конт. max}}$$

$$\varepsilon_{\text{нач}} = 0 \dots \varepsilon_{\text{max}}$$

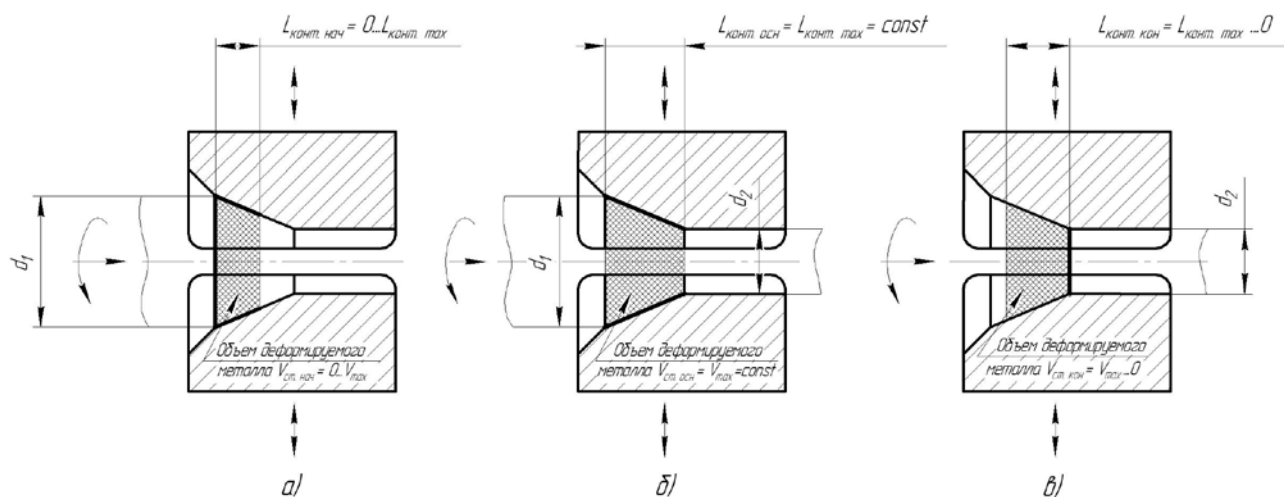
$$\Delta d = 0 \dots \Delta d_{\text{max}}$$

$$V_{\text{ст. нач}} = V_{\text{к}} = 0 \dots V_{\text{к max}},$$

где $L_{\text{конт. max}}$, $S_{\text{конт. max}}$, ε_{max} , Δd_{max} – наибольшие длина, площадь контакта заготовки с рабочей частью заходного конуса, степень деформации и абсолютное обжатие заготовки соответственно;

$V_{\text{к}}$ – объем металла, который деформируется в заходном конусе бойка;

$V_{\text{к max}}$ – наибольший объем деформируемого металла в заходном конусе бойка.



d_1 – начальный диаметр заготовки; d_2 – конечный диаметр; $L_{\text{конт}}$ – длина контакта заготовки с заходным конусом бойка

Рисунок 2.13 – Стадии деформирования заготовки при радиальном обжатии:

а) начальная; б) основная; в) конечная

Объем деформируемого металла на стадии $V_{\text{ст. нач}}$ будет равен объему, который обжимается в заходном конусе бойка $V_{\text{к}}$:

$$V_{\text{ст. нач}} = V_{\text{к}}$$

При этом объем металла в заходном конусе $V_{\text{к}}$ изменяется от нуля в начальный момент стадии до наибольшего значения в конечный:

$$V_k = 0 \dots V_{k \max}$$

Данная стадия характеризуется неустановившимся характером деформирования, при котором контактные и силовые характеристики изменяются с каждым последующим шагом подачи. Начальный диаметр деформируемой заготовки d_1 остается постоянным, в то время как конечный d_2 будет уменьшаться с каждым шагом подачи от наибольшего диаметра заготовки d_{\max} до наименьшего диаметра готовой детали d_{\min} :

$$d_1 = d_{\max} = \text{const}$$

$$d_2 = d_{\max} \dots d_{\min}$$

2. Основная стадия (рис. 2.13б) представляет собой установившийся процесс деформирования, когда объем смещенного металла и средняя скорость его течения за каждый шаг подачи остаются постоянными. Степень деформации ε , абсолютное обжатие Δd , объем обжимаемого металла в заходном конусе V_k , а также характеристики контакта на данной стадии остаются неизменными до момента выхода заготовки за начальную точку заходного участка:

$$L_{\text{конт. осн}} = L_{\text{конт. max}} = \text{const}$$

$$S_{\text{конт. осн}} = S_{\text{конт. max}} = \text{const}$$

$$\varepsilon_{\text{осн}} = \varepsilon_{\max} = \text{const}$$

$$\Delta d = \Delta d_{\max} = \text{const}$$

$$V_k = V_{k \max} = \text{const}$$

Исходя из постоянного абсолютного обжатия $\Delta d = \Delta d_{\max} = \text{const}$, можно сделать вывод, что начальный и конечный диаметр заготовки на данной стадии не изменяются по мере продвижения в калибрующий участок:

$$d_1 = d_{\max} = \text{const}$$

$$d_2 = d_{\min} = \text{const}$$

3. Конечная стадия (рис. 2.13в), которая характеризуется завершением процесса деформации в заходном конусе и выходом заготовки в калибрующий участок бойков. Контактные характеристики заготовки с рабочей частью бойков, объем деформируемого металла, относительная степень деформации и

абсолютное обжатие имеют взаимно обратный характер изменения по сравнению с начальной стадией:

$$L_{\text{конт. кон}} = L_{\text{конт. max}} \dots 0$$

$$S_{\text{конт. кон}} = S_{\text{конт. max}} \dots 0$$

$$\varepsilon_{\text{кон}} = \varepsilon_{\text{max}} \dots 0$$

$$\Delta d = \Delta d_{\text{max}} \dots 0$$

$$V_{\text{ст. кон}} = V_{\text{к}} = V_{\text{к max}} \dots 0$$

На данной стадии по мере прохождения заготовки в калибрующий участок переменным будет являться начальный диаметр d_1 , а конечный d_2 будет постоянным:

$$d_1 = d_{\text{max}} \dots d_{\text{min}}$$

$$d_2 = d_{\text{min}} = \text{const}$$

Объем металла в заходном конусе бойка варьируется от максимального в начальный момент стадии до нуля в конечной:

$$V_{\text{к}} = V_{\text{к max}} \dots 0$$

Учитывая условие постоянства объема при пластической деформации [38], общий объем деформируемой заготовки V можно определить как сумму объемов металла, обжимаемых рабочим участком бойка на всех стадиях:

$$V = \sum V_{\text{ст. i}} = V_{\text{ст. нач max}} + V_{\text{ст. осн}} + V_{\text{ст. кон max}} = V_{\text{ст. осн}} + 2V_{\text{к max}} \quad (2.12)$$

Объем деформируемого металла в основной стадии может быть определен как разность между общим объемом заготовки V и суммой наибольших объемов деформируемого металла в начальной и конечной стадии:

$$V_{\text{ст. осн}} = V - (V_{\text{ст. нач max}} + V_{\text{ст. кон max}}) \quad (2.13)$$

Учитывая, что на всех стадиях используется один и тот же обжимной инструмент, то наибольший объем деформируемого металла в заходном конусе будет одинаковым:

$$V_{\text{ст. нач max}} = V_{\text{ст. кон max}} = V_{\text{к max}} \quad (2.14)$$

Следовательно, объем обжимаемого металла в основной стадии $V_{\text{ст. осн}}$ с учетом (2.14) может быть определен как:

$$V_{ст. осн} = V - 2V_{к max} \quad (2.15)$$

Производительность радиального обжатия характеризуется объемом деформируемого металла в единицу времени. В процессе обжатия общий объем заготовки V остается постоянным, изменяется только диаметр и длина заготовки. Поэтому если общий объем заготовки V деформируется за время t_m , то объем металла $V_{ст. i}$, обжимаемый в i -ой стадии, будет пропорционален общему объему заготовки V так же как и время обжатия i -ой стадии $t_{ст. i}$ к суммарному машинному времени t_m :

$$\frac{V_{ст. i}}{V} = \frac{t_{ст. i}}{t_m} \quad (2.16)$$

Из пропорции (2.16) определяется время обжатия заготовки i -ой стадии:

$$t_{ст. i} = \frac{V_{ст. i} \cdot t_m}{V} \quad (2.17)$$

Общее машинное время обжатия равно сумме продолжительности всех стадий:

$$t_m = \sum t_{ст. i} = t_{ст. нач} + t_{ст. осн} + t_{ст. кон} \quad (2.18)$$

Учитывая (2.14) и (2.16), получим:

$$t_{ст. нач} = t_{ст. кон} \quad (2.19)$$

Усилие обжатия на заходном конусе бойка P_k находится в прямо пропорциональной зависимости от степени деформации $P_k(\varepsilon)$ [1, 3]. Следовательно, сила P_k также будет изменяться на стадиях аналогично степени деформации ε .

Предел текучести обрабатываемого материала σ_m определяется экспериментальным или расчетным путем. В данной работе расчет будет выполнен по зависимостям, приведенным в [73]. Такой способ расчета предела текучести стали в зависимости от содержания углерода широко применяется в производственной практике ввиду сравнительной простоты:

$$\text{— при } \varepsilon \leq 20 \%: \quad \sigma_m = -25 + 80C + 36\varepsilon^{0,23} \quad (2.20)$$

$$\text{— при } \varepsilon > 20 \%: \quad \sigma_m = 38 + 80C + 0,45\varepsilon, \quad (2.21)$$

где C – содержание углерода в обрабатываемом материале.

Из формул (2.20)-(2.21) следует, что предел текучести также находится в зависимости от степени деформации $\sigma_m(\varepsilon)$. В начальный момент процесса деформирования (при $\varepsilon=0$) предел текучести обрабатываемого материала будет иметь минимальное значение $\sigma_{m \min}$ в состоянии поставки обрабатываемого материала. При холодном пластическом деформировании образуется наклеп, приводящий к возрастанию предела текучести по мере возрастания относительной степени деформации. Следовательно, при ε_{\max} в конечной точке заходной части предел текучести достигает максимума. Эпюры изменения предела текучести заготовки и угла заходного конуса бойка на рабочем профиле ручья приведены на рисунке 2.14.

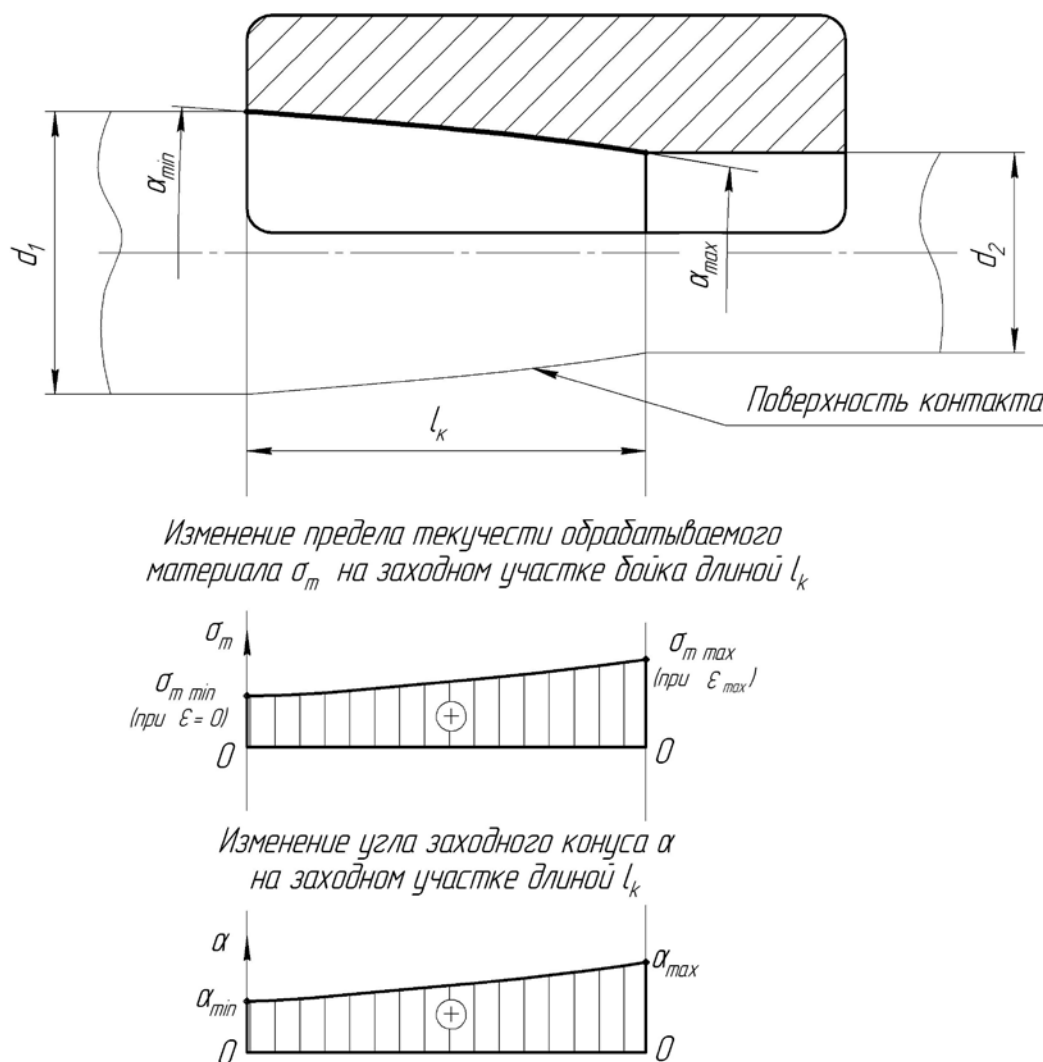


Рисунок 2.14 – Эпюры изменения предела текучести обрабатываемого материала и угла заходного конуса на длине очага формоизменения l_k

Исходя из особенностей изменения предела текучести на длине заходного участка, можно определить закономерности его изменения по стадиям:

– в начальной стадии σ_m изменяется от минимального при $\varepsilon=0$ до среднего напряжения цикла $\sigma_{m\text{ ср}}$ при полностью заполненном заходном конусе,

$$\text{где } \sigma_{m\text{ ср}} = \frac{\sigma_{m\text{ max}} + \sigma_{m\text{ min}}}{2} - \text{среднее напряжение цикла [1];}$$

– в основной стадии предел текучести будет постоянным $\sigma_{m\text{ осн}} = \sigma_{m\text{ ср}} = \text{const}$, т.к. одновременно в работе участвует весь заходный участок (рисунок 2.14);

– в конечной стадии по мере прохождения металла через заходный участок происходит упрочнение, в результате которого предел текучести будет возрастать от $\sigma_{m\text{ ср}}$ до наибольшего значения $\sigma_{m\text{ max}}$ в конечной точке при ε_{max} .

В случае деформирования заготовки бойками с выпуклым профилем угол α будет изменяться по стадиям аналогично пределу текучести заготовки σ_m и будет иметь постоянное среднее значение только в основной стадии $\alpha_{\text{осн}}$, когда заходный конус полностью заполненный (рисунки 2.13-2.14).

Основные закономерности и диапазоны изменения контактных и силовых характеристик процесса радиального обжатия приведены в таблице 2.1.

По полученным закономерностям, представленным в таблице 2.1, построены графики изменения основных характеристик радиального обжатия по стадиям процесса (рисунок 2.15).

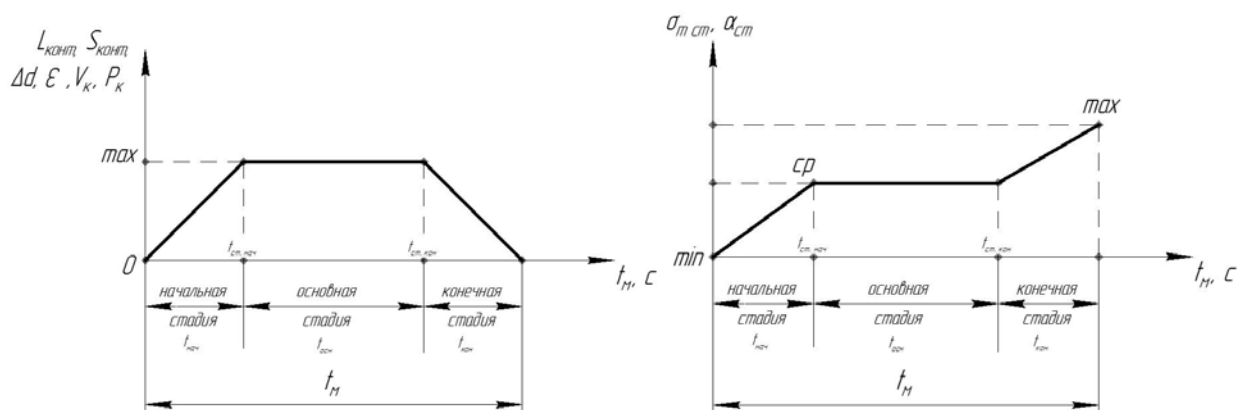


Рисунок 2.15 – Графики изменения основных характеристик процесса радиального обжатия по стадиям деформирования

Таблица 2.1 – Характер протекания процесса радиального обжатия по стадиям

Характеристика	Стадии процесса		
	Начальная	Основная	Конечная
Абсолютное обжатие заготовки Δd	$\Delta d_{нач} \in [0... \Delta d_{max})$	$\Delta d_{осн} = \Delta d_{max} = const$	$\Delta d_{кон} \in (\Delta d_{max}...0]$
Относительная степень деформации ε	$\varepsilon_{нач} \in [0... \varepsilon_{max})$	$\varepsilon_{осн} = \varepsilon_{max} = const$	$\varepsilon_{кон} \in (\varepsilon_{max}...0]$
Длина контакта заготовки с заходным конусом бойка $L_{конт. i}$	$L_{конт. нач} \in [0... L_{конт. max})$	$L_{конт. осн} = L_{конт. max} = const$	$L_{конт. кон} \in (L_{конт. max}...0]$
Площадь контакта заготовки с заходным конусом бойка $S_{конт. i}$	$S_{конт. нач} \in [0... S_{конт. max})$	$S_{конт. осн} = S_{конт. max} = const$	$S_{конт. кон} \in (S_{конт. max}...0]$
Объем деформируемого металла заготовки в заходном конусе V_k	$V_k \in [0... V_{k max})$	$V_k = V_{k max} = const$	$V_k \in (V_{k max}...0]$
Объем деформируемого металла на стадии $V_{см. i}$	$V_{см. нач} = V_k \in [0... V_{k max})$	$V_{см. осн} \in [V_{k max}... (V - 2V_{k max})]$	$V_{см. кон} = V_k \in (V_{k max}...0]$
Начальный диаметр заготовки d_1	$d_1 = d_{max} = const$	$d_1 = d_{max} = const$	$d_1 \in (d_{max}...d_{min}]$
Конечный диаметр заготовки d_2	$d_2 \in [d_{max}...d_{min})$	$d_2 = d_{min} = const$	$d_2 = d_{min} = const$
Длительность стадии $t_{см. i}$	$t_{см. нач} = \frac{V_{k max} \cdot t_m}{V}$	$t_{см. осн} = \frac{V_{см. осн} \cdot t_m}{V}$	$t_{см. кон} = \frac{V_{k max} \cdot t_m}{V}$
Временной интервал стадий	$t_{нач} \in [0... t_{см. нач})$	$t_{осн} \in [t_{см. нач}... t_{см. кон}]$	$t_{кон} \in (t_{см. кон}... t_m]$
Усилие обжатия на заходном конусе бойка $P_{к см. i}$	$P_{к см. нач} \in [0... P_{к max})$	$P_{к см. осн} = P_{к max} = const$	$P_{к см. кон} \in (P_{к max}...0]$
Угол заходного конуса бойка $\alpha_{см. i}^*$	$\alpha_{см. нач} \in [\alpha_{min}... \alpha_{cp})$	$\alpha_{см. осн} = \alpha_{cp} = const$	$\alpha_{см. кон} \in (\alpha_{cp}... \alpha_{max}]$
Предел текучести обрабатываемого материала $\sigma_{m см. i}$	$\sigma_{m нач} \in [\sigma_{m min}... \sigma_{m cp})$	$\sigma_{m осн} = \sigma_{m cp} = const$	$\sigma_{m кон} \in (\sigma_{m cp}... \sigma_{m max}]$
Характер процесса деформирования	неустановившийся	установившийся	неустановившийся

Примечание: * – учитывается при обжатии бойками с переменным углом заходного конуса

Из представленных результатов (табл. 2.1, рис. 2.15) следует, что каждая стадия процесса радиального обжатия характеризуется определенными закономерностями изменения контактных и силовых характеристик на длине очага формоизменения. Отличительной особенностью основной стадии является установившийся характер деформирования, который характеризуется постоянством относительной степени деформации, объемом деформируемого металла в заходном конусе, контактными характеристиками и усилием деформирования. Основная стадия является наиболее нагруженной вследствие максимальной степени деформации и наибольшего объема одновременно деформируемого металла в заходном участке V_k .

Результаты теоретических исследований радиального обжатия по стадиям процесса в дальнейшем будут использованы для разработки математической модели, в которой учитывается изменение угла заходного конуса бойка и предела текучести обрабатываемого материала и методики расчета энергосиловых параметров при обжатии бойками с переменным углом заходного конуса.

2.4 Анализ базовой методики расчета энергосиловых параметров холодного радиального обжатия

К основным энергосиловым параметрам радиального обжатия относится сила P и мощность деформирования N [1, 2, 5]. В настоящее время для определения энергосиловых параметров обжатия используется методика Радюченко Ю.С., приведенная в работе [1].

Полное усилие деформирования радиального обжатия P складывается из составляющих, приходящихся на заходный и калибрующий участки ручья бойков:

$$P = P_k + P_{\text{ц}}, \quad (2.22)$$

где P_k – сила, приходящееся на заходный (конический) участок;

$P_{\text{ц}}$ – сила на калибрующем (цилиндрическом) участке бойка.

В процессе деформирования на калибрующий участок бойка заготовка поступает уже обжатая до требуемого размера на заходном конусе. Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям [1, 11, 24, 25] усилие калибровки P_u необходимо учитывать только при соотношении калибрующей части к конической $\frac{l_u}{l_k} < 0,5$, следовательно в таких случаях полное усилие деформирования будет равно усилию обжатия только на конической части бойка:

$$P = P_k \quad (2.23)$$

Так как основная работа деформирования осуществляется в заходном конусе бойка, то с целью уменьшения износа калибрующего участка в производственной практике чаще всего используются бойки с такой конфигурацией профиля ручья, когда длина заходного конуса превышает длину калибрующего более чем в два раза и выполняется условие (2.23) [1].

Сила деформирования на заходном конусе бойка P_k в холодном виде определяется по формуле:

$$P_k = \frac{d_0^2 \sigma_m}{4\mu} \left(\left(\left[\frac{d_1}{d_0} \right]^{\frac{4\mu}{\operatorname{tg} \alpha}} - 1 \right) + \left(\left[\frac{d_0}{d_2} \right]^{\frac{4\mu}{\operatorname{tg} \alpha}} - 1 \right) \right), \quad (2.24)$$

где P_k – сила обжатия на заходном конусе бойка;

d_1 – начальный диаметр заготовки;

d_2 – конечный диаметр;

α – угол заходного конуса бойка;

μ – коэффициент трения рабочей поверхности бойка с заготовкой. Обычно при холодном обжатии $0 < \mu < 0,2$ [1];

σ_m – предел текучести обрабатываемого материала, который принимается как среднее напряжение цикла деформирования [1]:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m_n} + \sigma_{m_k}}{2}, \quad (2.25)$$

где σ_{m_n} – предел текучести материала заготовки до обжатия;

σ_{m_k} – предел текучести материала заготовки после деформации с учетом упрочнения. Под циклом деформирования подразумевается совокупность последовательных значений напряжений (деформаций) за один период их изменения при деформировании от начального диаметра d_1 до конечного d_2 [1].

d_0 – диаметр нейтральной поверхности, определяемый по формуле:

$$d_0 = \frac{d_1}{1 + \varepsilon(\xi + \nu \operatorname{tg} \alpha)}, \quad (2.26)$$

где ν , ξ – коэффициенты, характеризующие неравномерность влияния коэффициента трения μ [1, 2];

ε – относительная степень деформации:

$$\varepsilon = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1^2} \quad (2.27)$$

Далее вычисляется среднее удельное усилие на заходном конусе:

$$P_{yc} = \frac{P_k \cdot 4 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{d_1^2 - d_2^2} \quad (2.28)$$

Площадь проекции очага деформации:

$$F_n = \frac{d_1^2 - d_2^2}{4 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \quad (2.29)$$

Затем рассчитываются энергетические параметры. Полная работа формоизменения определяется по формуле:

$$A_n = 1,25 P_{yc} \cdot 0,785 d_1^2 \cdot l_0 \cdot \ln \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\ln \frac{d_1^2}{d_2^2}} \right), \quad (2.30)$$

где P_{yc} – среднее удельное усилие обжатия;

l_0 – длина обжимаемой заготовки на переходе, вычисляемая как:

$$l_0 = \frac{V}{0,785 \cdot d_1^2}, \quad (2.31)$$

где V – объем деформируемого металла заготовки на переходе.

Машинное время обжатия t_m рассчитывается по формуле [1]:

$$t_m = \frac{60l_0}{\left(s - \frac{s \cdot (d_1^2 - d_2^2)}{d_1^2} \right) \cdot f \cdot n \cdot p}, \quad (2.32)$$

где s – шаг подачи на обжатие;

n – частота вращения обжимной заготовки или число двойных ходов обжимного инструмента;

f – коэффициент скольжения рабочего привода машины;

p – число опорных элементов в обойме привода обжимной машины.

Необходимая мощность обжатия вычисляется по формуле, кВт:

$$N = \frac{A_n}{1000 \cdot 102 \cdot t_m} \quad (2.33)$$

Затем, исходя из развиваемой силы и требуемой мощности, подбирается оборудование для реализации технологического процесса радиального обжатия.

Однако в методике расчета энергосиловых параметров, предложенной Радюченко Ю.С., вывод расчетной формулы (2.24) основан на допущении постоянного предела текучести σ_m , равному среднему напряжению цикла деформирования, который вычисляется по формуле (2.25). В действительности же предел текучести σ_m изменяется и не равен постоянному среднему значению на всех стадиях деформирования в связи с изменением относительной степени деформации ε по стадиям (рисунки 2.14-2.15). Проведенные автором экспериментальные исследования подтверждают достоверность формулы (2.24) при обжатии различных материалов. Наибольшее отклонение экспериментальных данных от расчетных составило 8% [1]. То есть, разработанная Радюченко Ю.С. методика расчета энергосиловых параметров холодного радиального обжатия по формулам (2.24)-(2.33) справедлива только для вычислений в основной стадии с наибольшей степенью деформации ε_{max} без возможности исследования закономерностей изменения параметров по остальным стадиям.

К тому же, при обжатии бойками с переменными углами заходного конуса, профиль ручья которых представлен в виде кривой, угол α также не будет постоянным на всем очаге деформаций (рисунки 2.13-2.14). А это приводит к тому, расчет энергосиловых параметров по формулам (2.24)-(2.33) может быть использован только в случае обжатия стандартными бойками с постоянным углом α .

Для более точных вычислений необходимо разработать математическую модель, учитывающую изменение угла заходного конуса α и предела текучести обрабатываемого материала σ_m по стадиям деформирования с постепенным приращением обжимаемого диаметра на определенный шаг. Это даст возможность определить закономерности изменения энергосиловых параметров по стадиям процесса.

2.5 Методика расчета энергосиловых параметров холодного радиального обжатия по стадиям деформирования

Абсолютное обжатие заготовки Δd вычисляется по формуле:

$$\Delta d = d_1 - d_2 = d_{max} - d_{min} \quad (2.34)$$

Из формул (2.20)-(2.34) можно выявить следующие функциональные зависимости, которые представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Функциональные зависимости энергосиловых параметров радиального обжатия

<i>Параметр</i>	<i>Зависимость</i>	<i>Номер формулы</i>
Абсолютное обжатие Δd	$\Delta d = f(d_1, d_2)$	(2.35)
Относительная степень деформации ε	$\varepsilon = f(d_1, d_2)$	(2.36)
Предел текучести σ_m	$\sigma_m = f(\varepsilon(d_1, d_2))$	(2.37)
Диаметр нейтральной поверхности d_0	$d_0 = f(\varepsilon(d_1, d_2), \alpha)$	(2.38)

Усилие обжатия на заходном конусе P_{κ}	$P_{\kappa} = f(\mathbf{d_0}, \sigma_m, d_1, \mathbf{d_2}, \alpha, \mu)$	(2.39)
Среднее удельное усилие P_{cp}	$P_{cp} = f(P_{\kappa}, \alpha, \mathbf{d_2})$	(2.40)
Площадь проекции очага деформации F_n	$F_n = f(d_1, \mathbf{d_2}, \alpha)$	(2.41)
Полная работа формоизменения A_n	$A_n = f(P_{cp}, d_1, \mathbf{d_2}, l_0, \mu, \alpha)$	(2.42)
Мощность обжатия N	$N = f(A_n, t_m)$	(2.43)

Примечание: жирным шрифтом выделены переменные величины в зависимостях, при этом для конечной стадии вместо d_2 переменным будет начальный диаметр d_1

Из представленных зависимостей (2.35)-(2.43) видно, что все энергосиловые параметры процесса радиального обжатия зависят от диаметра обжимаемой заготовки: начального d_1 и конечного d_2 . Если диаметры заготовки представить как независимые переменные, а параметры как искомые функции (переменные от d_1 или d_2 величины), то можно исследовать характер изменения показателей процесса по стадиям деформирования. При этом в базовой методике Радюченко Ю.С. отсутствует математическая зависимость между углом заходного конуса бойка α с каким-либо параметром процесса. Следовательно, при разработке методики расчета необходимо вывести зависимость угла заходного конуса α от любой величины или параметра процесса. Изменение коэффициента трения μ в базовой методике учитывается с помощью дополнительных коэффициентов ν и ξ , которые характеризуют неравномерность характера трения поверхности инструмента с заготовкой, поэтому коэффициент трения можно принять постоянным $\mu = const$ [1]. Исходя из условия постоянства обжимаемого объема металла (2.12)-(2.19), начальная длина обжимаемой заготовки принимается неизменной $l_0 = const$ [38] и общее машинное время обжатия также будет представлять собой постоянную величину $t_m = const$. Итак, в математической модели постоянными величинами ($const$) будут приняты:

- 1) объем обжимаемой заготовки V ;
- 2) начальная длина обжимаемой заготовки l_0 ;

3) коэффициент трения между поверхностью бойка и заготовкой μ и коэффициенты ν и ξ , учитывающие неравномерность характера трения;

4) машинное время обжата заготовки t_m ;

5) содержание углерода в обрабатываемом материале C ;

6) режимы обработки;

7) угол заходного конуса α (только для бойков базового исполнения).

Для исследования закономерностей изменения энергосиловых параметров радиального обжата по стадиям деформирования будет применено пошаговое интегрирование по методу наименьших квадратов. Абсолютное обжатие Δd разбивается на n равных отрезков точками $\Delta d_i = \Delta d_{min} + ih$ с шагом h ,

где Δd_i – абсолютное обжатие заготовки на i -ом шаге;

Δd_{min} – минимальное абсолютное обжатие заготовки в начальный момент:

$$\Delta d_{min} = 0;$$

$$h = \frac{\Delta d_{max} - \Delta d_{min}}{n} = \frac{d_1 - d_2}{n} \text{ – шаг интегрирования;}$$

$i = 0...n$ – полный диапазон разбивки абсолютного обжата на отрезки (шаги).

Так как абсолютное обжатие заготовки представляет собой функцию от диаметра заготовки $\Delta d(d_1)$ и $\Delta d(d_2)$, поэтому формулу (2.34) можно выразить следующим образом:

– для начальной и основной стадии:

$$\Delta d_i(d_2) = d_1 - d_{2_i} \quad (2.44)$$

– для конечной стадии:

$$\Delta d_i(d_1) = d_{1_i} - d_2 \quad (2.45)$$

где d_{1_i} и d_{2_i} – начальный и конечный диаметр заготовки на i -ом шаге соответственно;

d_{2_0} – начальное значение конечного диаметра перед обжатием в начальной и основной стадии $d_{2_0} = d_1 = d_{max}$;

d_{l_0} – начальное значение конечного диаметра перед обжатием в конечной стадии $d_{l_0} = d_{max}$.

Так как на всех стадиях величина шага h не изменяется, то начальный диаметр конечной стадии и конечный диаметр начальной стадии на i -ых шагах будут равными:

$$d_{l_i} = d_{2_i} \quad (2.46)$$

Шаг интегрирования с учетом (2.44)-(2.46) можно выразить так:

$$h = \frac{d_{2_0} - d_{2_n}}{n} = \frac{d_{l_0} - d_{l_n}}{n} = \frac{d_{max} - d_{min}}{n} \quad (2.47)$$

С целью упрощения расчетов в начальной и основной стадии будет разбиваться на шаги конечный диаметр заготовки d_2 , а в конечной стадии — начальный d_l . Последовательные значения диаметров заготовки на i -ых шагах:

$$\begin{aligned} d_{2_i} &= d_{2_0} - ih \\ d_{l_i} &= d_{l_0} - ih \end{aligned} \quad (2.48)$$

Учитывая закономерности изменения основных характеристик радиального обжатия (таблица 2.1), каждой стадии будут соответствовать следующие диапазоны (рисунок 2.16):

- для начальной $i = 0 \dots n - 1$ (при переменном $d_{2_i} = d_{2_0} \dots d_{2_{n-1}}$);
- для основной $i = 0 \dots n$ (при переменном $d_{2_i} = d_{2_0} \dots d_{2_n}$);
- для конечной $i = 1 \dots n$ (при переменном $d_{l_i} = d_{l_1} \dots d_{l_n}$).

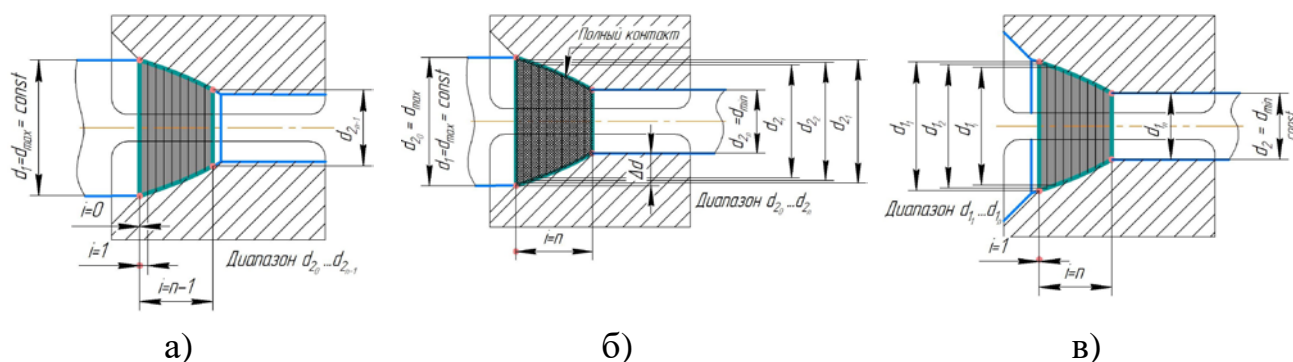


Рисунок 2.16 – Разбивка диапазона абсолютного обжатия на отрезки по стадиям деформирования: а) в начальной; б) в основной; в) в конечной

Таким образом, в начальной и основной стадии с каждым последующим шагом конечный диаметр d_{2_i} будет уменьшаться на шаг h , а начальный диаметр d_1 остается одинаковым, а в конечной стадии — наоборот.

Учитывая конфигурацию профиля ручья бойков, угол заходного конуса α задается массивом данных для конкретного профиля бойка, т. е. с каждым шагом по диаметру заготовки d_i на i -ом шаге соответствует определенное значение угла α_i :

$$\begin{aligned} \text{при } d_0 &\rightarrow \alpha_0 \\ \text{при } d_i &\rightarrow \alpha_i \\ &\vdots \\ \text{при } d_n &\rightarrow \alpha_n \end{aligned} \quad (2.49)$$

Так как значения α_i представлены в виде массива данных совместно с d_i , то зависимости $\alpha_i(d_{2_i})$ и $\alpha_i(d_{1_i})$ можно выразить с помощью метода наименьших квадратов, по которому расчетное значение угла на i -ом шаге $\alpha_{расч\ i}$ будет равно:

$$\alpha_{расч\ i} = k_0 + k_1 d_i, \quad (2.50)$$

где k_0, k_1 — числовые коэффициенты;

$d_i = d_{2_i}$ — для начальной и основной стадии, $d_i = d_{1_i}$ — для конечной.

Требуется найти значения коэффициентов k_0 и k_1 таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений между заданным значением угла α_i и расчетным $\alpha_{расч\ i}$ была наименьшей:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_{расч\ i})^2 &\rightarrow \min \\ S(k_0, k_1) &= \sum_{i=1}^n (\alpha_i - k_0 - k_1 d_i)^2 \rightarrow \min \end{aligned} \quad (2.51)$$

Сумма $S(k_0, k_1)$ является функцией нескольких переменных. Необходимый признак экстремума функций нескольких переменных заключается в том, что ее частные производные должны обращаться в ноль:

$$\begin{aligned}
\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial k_0} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial k_1} = 0 \end{cases} &\rightarrow \begin{cases} \frac{\partial S}{\partial k_0} = \sum_{i=1}^n 2(\alpha_i - k_0 - k_1 d_i) \cdot 1 = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial k_1} = \sum_{i=1}^n 2(\alpha_i - k_0 - k_1 d_i) \cdot (d_i) = 0 \end{cases} \rightarrow \\
&\begin{cases} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - k_0 - k_1 d_i) = 0 \\ \sum_{i=1}^n (d_i \alpha_i - k_0 d_i - k_1 d_i^2) = 0 \end{cases}
\end{aligned} \tag{2.52}$$

Преобразуя уравнения системы (2.52), можно получить:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n k_0 + k_1 \sum_{i=1}^n d_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i \\ k_0 \sum_{i=1}^n d_i + k_1 \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n d_i \alpha_i \end{cases} \rightarrow \begin{cases} nk_0 + k_1 \sum d_i = \sum \alpha_i \\ k_0 \sum d_i + k_1 \sum d_i^2 = \sum d_i \alpha_i \end{cases} \tag{2.53}$$

Таким образом, получена система линейных уравнений с двумя неизвестными k_0 и k_1 . Из уравнений (2.53) определяются коэффициенты k_0 и k_1 по формулам Крамера:

$$\begin{aligned}
k_0 &= \frac{\sum \alpha_i \sum d_i^2 - \sum d_i \sum d_i \alpha_i}{n \sum d_i^2 - (\sum d_i)^2} \\
k_1 &= \frac{n \sum d_i \alpha_i - \sum d_i \sum \alpha_i}{n \sum d_i^2 - (\sum d_i)^2}
\end{aligned} \tag{2.54}$$

После подстановки найденных значений k_0 и k_1 в уравнение (2.53), определяется угол $\alpha_{расч\ i}$ в конечных точках i -го шага.

Однако найденное расчетное значение $\alpha_{расч\ i}$ характеризует угол заходного конуса только в конечной точке i -ого шага. Поэтому угол на i -ом шаге $\alpha_{ш\ i}$ может быть определен как среднее значение углов $\alpha_{расч\ i}$ на рассматриваемом диапазоне:

$$\alpha_{ш\ i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (k_0 + k_1 d_i) = \frac{1}{n} (\alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_n) \tag{2.55}$$

Далее определяется случайная ошибка χ_i :

$$\chi_i = (\alpha_i - \alpha_{расч\ i})^2 \quad (2.56)$$

По базовой методике Радюченко Ю.С. наибольшая допускаемая ошибка принимается равной не более $\pm 8\%$ [1]. Поэтому оценка погрешности модели будет оцениваться таким же образом.

Подобно углу заходного конуса, предел текучести обрабатываемого материала на i -ом шаге $\sigma_{m_{ui}}$ можно выразить как среднее значение рассматриваемого диапазона (цикла) аналогично соотношению (2.55):

$$\sigma_{m_{ui}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{m_i} = \frac{1}{n} (\sigma_{m_0} + \sigma_{m_1} \dots + \sigma_{m_n}) \quad (2.57)$$

С учетом (2.20) и (2.21) формулу (2.57) можно выразить соответственно так:

$$\text{– при } \varepsilon_i \leq 20\%: \quad \sigma_{m_{ui}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (-25 + 80C + 36\varepsilon_i^{0,23}) \quad (2.58)$$

$$\text{– при } \varepsilon_i > 20\%: \quad \sigma_{m_{ui}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (38 + 80C + 0,45\varepsilon_i) \quad (2.59)$$

Исходя из выявленных закономерностей изменения основных показателей процесса (таблица 2.1) и разбивки обжимаемого диаметра на отрезки (рисунок 2.16), определяются значения всех энергосиловых параметров радиального обжатия с учетом переменных величин угла заходного конуса α_{ui} и предела текучести обрабатываемого материала $\sigma_{m_{ui}}$ на каждом i -ом шаге. При этом для начальной и основной стадии переменным является конечный диаметр обжатия d_{2_i} , для конечной — начальный d_{1_i} . Блок-схема расчета энергосиловых параметров с основными формулами представлена на рисунке 2.17 (переменные величины обведены рамкой).

Затем будет выполнено сравнение полученных результатов при использовании бойков выпуклого профиля деформирующей зоны.

Предлагаемая методика позволит не только рассчитать энергосиловые параметры радиального обжатия при деформировании заготовок бойками с переменным углом заходного конуса, но и исследовать закономерности изменения по стадиям процесса.

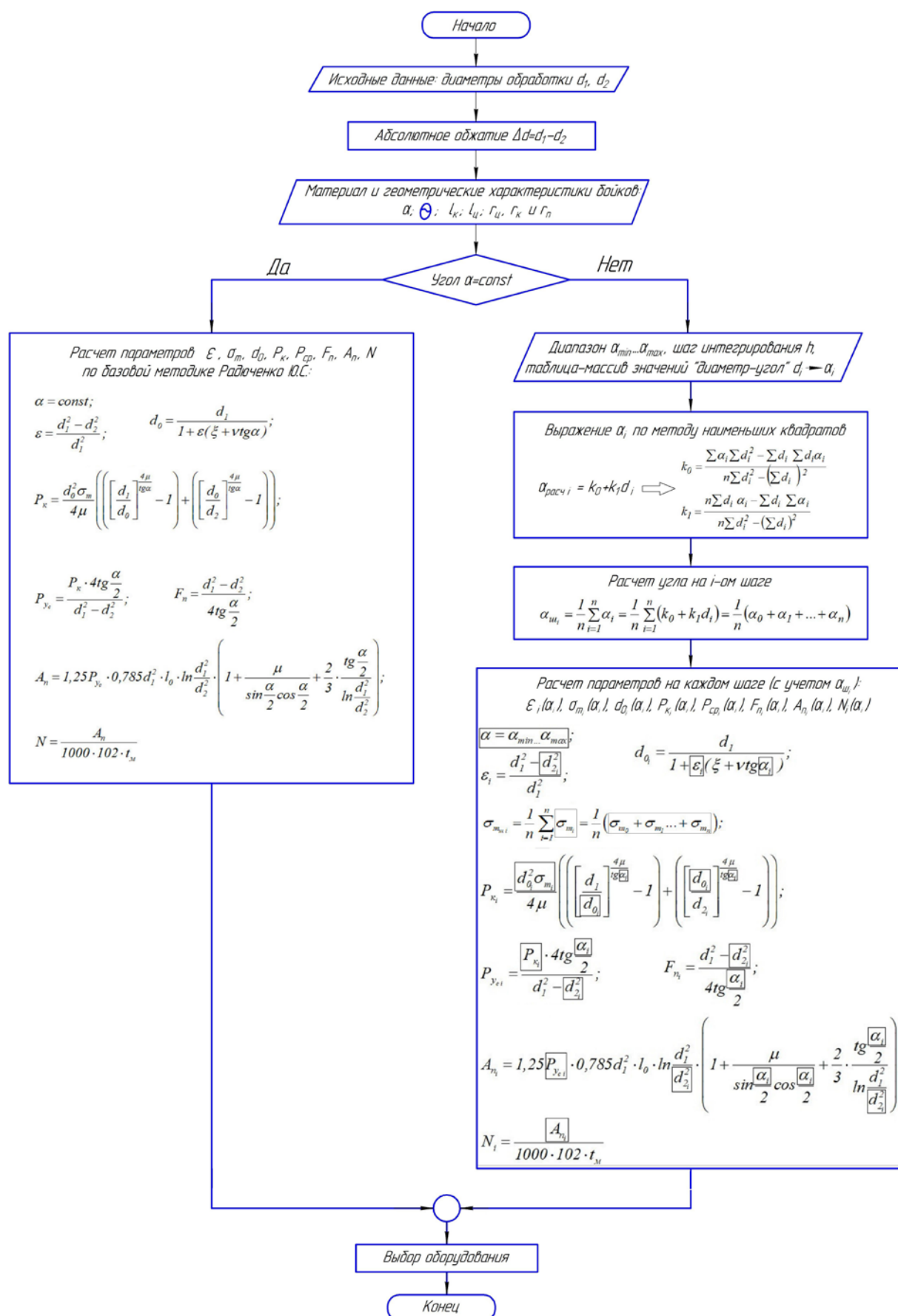


Рисунок 2.17 – Блок-схема расчета энергосиловых параметров в зависимости от угла заходного конуса бойка α

2.6 Выводы по главе 2

1. Исследованы закономерности изменения контактных и энергосиловых параметров радиального обжатия по стадиям деформирования. При этом основная стадия является наиболее нагруженной вследствие максимальной степени деформации и наибольшего объема одновременно деформируемого металла в заходном участке. В основной стадии наблюдается установившийся характер деформирования, который характеризуется постоянством длины контакта заготовки с рабочей частью инструмента, объемом обжимаемого металла и равномерным нагружением заходного конуса бойка.

2. Разработана и исследована математическая модель холодного радиального обжатия сплошных цилиндрических заготовок с помощью пошагового интегрирования по методу наименьших квадратов, численно учитывающая изменение угла заходного конуса бойка и предела текучести обрабатываемого материала по стадиям деформирования. Результаты моделирования позволили разработать научно обоснованную методику расчета энергосиловых параметров радиального обжатия бойками с переменными углами заходного конуса, которая позволяет рассчитать энергосиловые параметры процесса при деформировании заготовок бойками с различной геометрией заходного конуса.

3. Производственный опыт показывает, что при проектировании бойков с переменным углом заходного конуса желательно принимать такую форму поверхности заходного участка, которая имела бы плавное изменение угла и могла быть выражена простым математическим выражением. Исходя из решения вариационной задачи выявлено, что наиболее целесообразными кривыми, описывающими профиль входной зоны бойка является парабола вида $y=0,5x^2$, гипербола $y = \frac{1}{x}$ и функция натурального логарифма $y=\ln x$.

4. Применение бойков с переменным углом заходного конуса выпуклого профиля позволит снизить силовые нагрузки и энергозатраты процесса радиального обжатия.

5. Расчет энергосиловых параметров радиального обжатия с помощью пошагового интегрирования по методу наименьших квадратов может являться критерием эффективности применения бойков с переменным углом заходного конуса.

3 ЭКПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАДИАЛЬНОГО ОБЖАТИЯ

3.1 Методика проведения экспериментальных исследований

Теоретические исследования процесса радиального обжатия по стадиям деформирования показали, что применение бойков с переменным углом заходного конуса, имеющих выпуклый профиль, позволят снизить силовые нагрузки и энергозатраты, расходуемые на деформацию заготовки. Цель проведения эксперимента заключается в определении фактического усилия обжатия при деформировании заготовок бойками с различной конфигурацией входной зоны и сравнение полученных результатов с расчетными значениями по методике, приведенной в п. 2.5. Если расхождения результатов эксперимента с теоретическими расчётами будут составлять не более 15% [22], то разработанная математическая модель, а также допущения, принятые при ее разработке, принимаются адекватными.

Для проведения эксперимента используется гидравлический пресс модели П–125 (рисунок 3.1) с развиваемым усилием до 125 тс (1250 кН).



Рисунок 3.1 – Гидравлический пресс П–125

Определение усилия производится путем снятия показаний с циферблата блока управления (рисунок 3.1). Основные технические характеристики пресса приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные технические характеристики гидравлического пресса модели П–125

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Тип пресса (компоновка)	двухколонный вертикальный
Наибольшая создаваемая нагрузка, <i>т (кН)</i>	125 (1250)
Тип привода и силоизмерителя	электрогидравлический, торсионный
Отображение данных испытания	аналоговый циферблат
Диапазон измерения основной / дополнительный, <i>кН</i>	125–625 / 250–1250
Погрешность при нагружении, не более, %	±2% от создаваемой нагрузки
Диапазон скорости перемещения поршня без нагрузки, <i>мм/с</i>	0...0,3
Рабочий ход гидравлического поршня, не менее, <i>мм</i>	50
Максимальная скорость перемещения гидравлического поршня, <i>мм/мин</i>	78
Размеры опорных плит, <i>мм×мм</i>	440×440
Высота рабочего пространства, <i>мм</i>	800
Расстояние между колоннами, <i>мм</i>	470
Габаритные размеры (длина×ширина×высота), <i>мм</i>	1920×820×2180
Масса, <i>кг</i>	2200
Потребляемая мощность, <i>кВт</i>	3,5

При проведении экспериментальных исследований будет производиться деформирование цилиндрических заготовок диаметром с 37 до 34 мм, относительная степень деформации $\varepsilon=0,16$. В качестве образцов используются штучные заготовки из стали 45 ГОСТ 1050–2013, разрезанные из круглого горячекатаного проката по ГОСТ 2590–2006. Внешний вид штучной заготовки и ее эскиз представлен на рисунке 3.2.

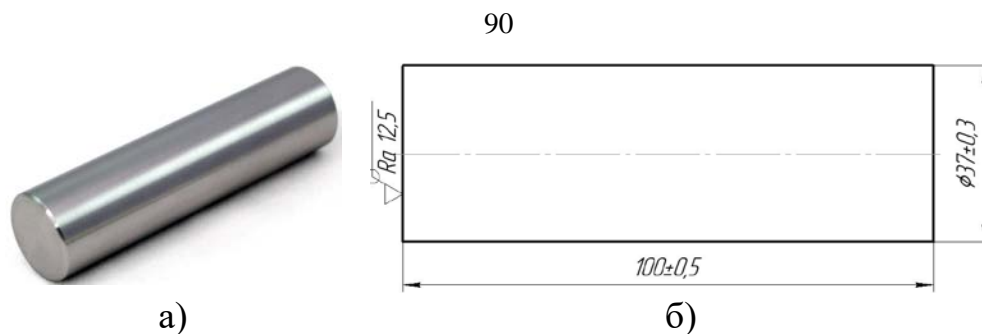


Рисунок 3.2 – Применяемые образцы штучных заготовок из стали 45
ГОСТ 1050-2013: а) внешний вид; б) эскиз

На основе технологической оснастки и инструмента, используемых в производственных условиях АО "Навлинский завод "Промсвязь" (п. Навля Брянской обл.), разработаны и изготовлены комплекты обжимных бойков, конструктивные размеры которых приняты согласно рекомендациям, приведенным в [1], а форма заходного конуса выполнена по кривым, рассмотренным в п. 2.2. Материал инструментов — сталь 5ХНВ ГОСТ 5950–2000. Фото и эскиз применяемых бойков представлен на рисунке 3.3, а основные геометрические характеристики сведены в таблицу 3.2.

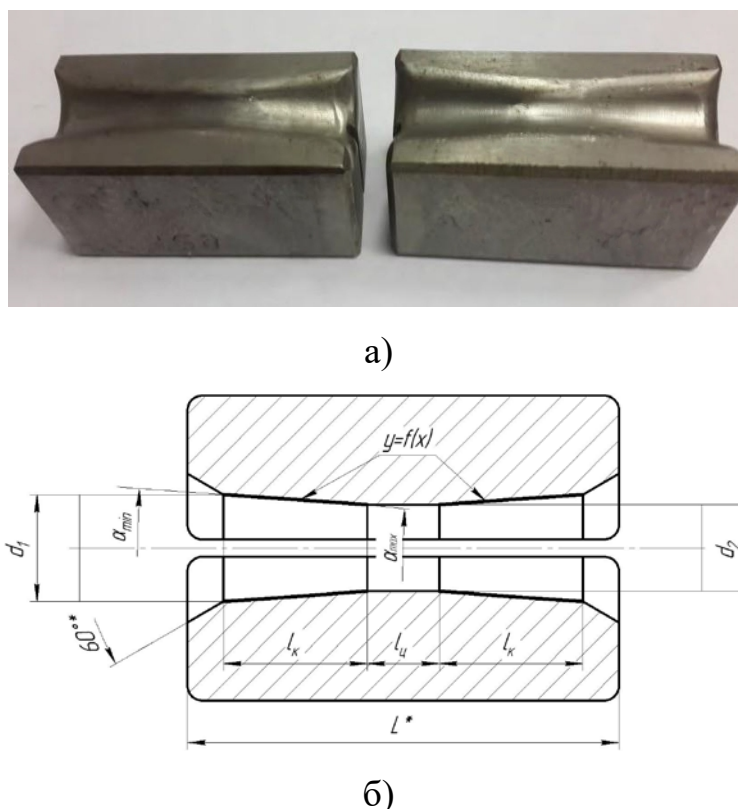


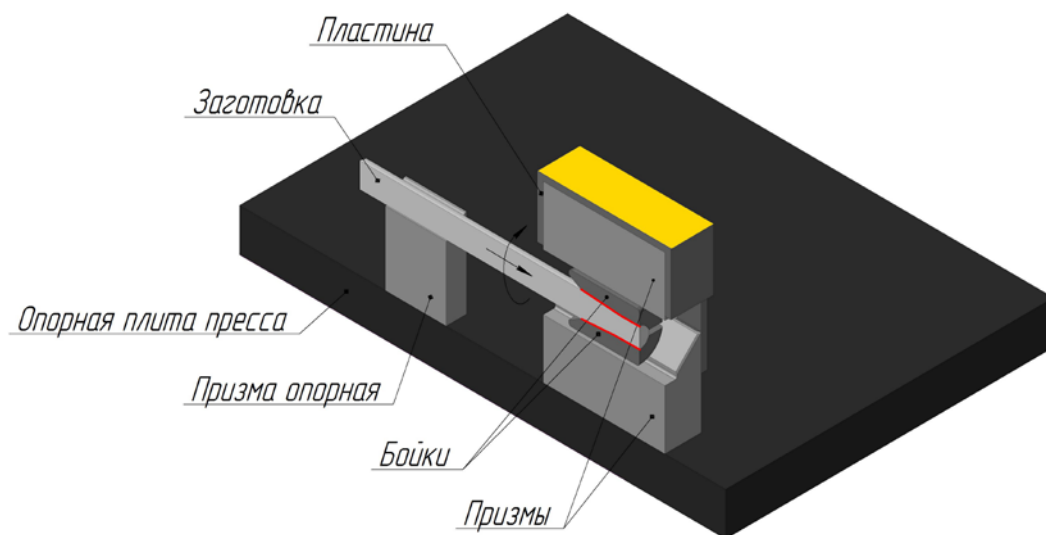
Рисунок 3.3 – Применяемые бойки: а) фото комплекта бойков с гиперболическим профилем; б) эскиз применяемых бойков

Таблица 3.2 – Основные геометрические параметры используемых бойков по рисунку 3.3б

<i>Профиль бойка</i> <i>Геометрические параметры</i>	<i>Базовый</i> <i>($\alpha = \text{const}$)</i>	<i>Параболический</i>	<i>Гиперболический</i>	<i>Логарифмический</i>
Начальный диаметр заготовки d_1 , мм	37			
Конечный диаметр заготовки d_2 , мм	34			
Угол заходного конуса в начальной точке α_{\min}	7°30'			
Угол заходного конуса в конечной точке α_{\max}	7°30'	7°41'	11°34'	8°21'
Длина заходного конуса l_k , мм	25	30	37	30
Длина калибрующего участка l_u , мм	10	10	15	10
Закон изменения образующей заходного конуса $y = f(x)$	$y = kx + b$	$y = 0,5x^2$	$y = \frac{1}{x}$	$y = \ln x$
Общая длина бойка L , мм	70	80	100	80

Принимая во внимание призматическую конфигурацию опорных плит пресса и цилиндрическую форму бойков, для моделирования процесса обжатия используется комплект технологической оснастки, представляющий собой простое по конструкции приспособление для придания заготовке и инструменту стабильного положения в процессе деформирования. Трехмерная модель и фотография технологической оснастки представлены на рисунке 3.4.

В качестве установочных элементов применяются призмы, в которые закладываются обжимные бойки, а заготовка помещается между бойками. Благодаря плоской опорной поверхности призм появляется возможность передать рабочее усилие гидроцилиндра пресса на заходный конус бойка. При этом подача заготовки на 10 мм в заходный участок и ее проворот на $45^\circ \pm 5^\circ$ осуществляется вручную на каждом цикле деформирования. Принцип работы приспособления обеспечивает требуемое положение бойков и заготовки до и во время обжатия и подобен описываемым схемам установки в работе [48].



а)



б)

Рисунок 3.4 – Комплект технологической оснастки для проведения эксперимента:

а) трехмерная модель; б) внешний вид приспособления

Для контроля окончательного диаметра обжимаемых образцов используется штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89, а для измерения длительности процесса деформирования применяется секундомер модели CASIO HS80.

Машинное время обжатия используемого образца в условиях базового предприятия составляет 18 секунд на ротационно-обжимной машине В2226.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем:

1. Подготовка образцов согласно рисунку 3.2 с последующей разметкой по длине на 10 частей рисками (рисунок 3.5). В данной работе всего изготовлено 64 штучных заготовки.

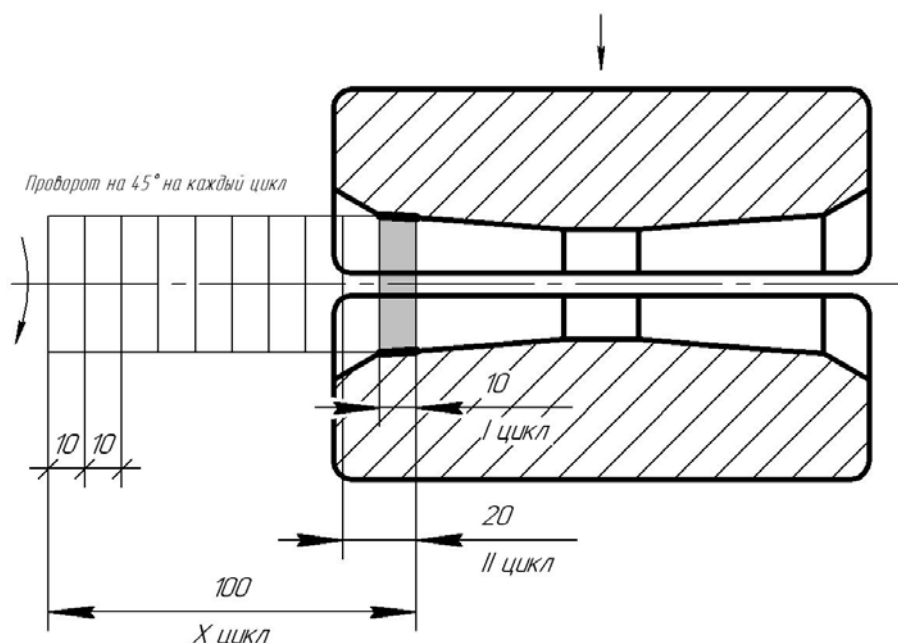


Рисунок 3.5 – Схема обжатия заготовки, заготовка изображена в момент I цикла

2. Изготовление четырех комплектов обжимных бойков (рисунок 3.3) согласно геометрическим параметрам, приведенным в таблице 3.2.

3. Изготовление и сборка технологической оснастки согласно рисунку 3.4. Затем собранное приспособление размещается на нижней опорной плите пресса.

4. Включение пресса. Подача заготовки на 10 мм в зону заходного участка, затем опускание траверсы и обжатие заготовки до сомкнутого положения бойков, т.е. осуществление первого цикла деформирования (рисунок 3.5).

5. Измерение усилия путем снятия показаний с циферблата пресса и длительности цикла деформирования с помощью секундомера. Определение длительности цикла необходимо для определения производительности и расчета необходимой мощности.

6. Подъем траверсы на небольшую высоту (примерно 10...20 мм) для ручной подачи заготовки на 10 мм с проворотом на угол $45^\circ \pm 5^\circ$ в зону обработки на последующий цикл обжатия (рисунок 3.5).

Повторение п. 5-6 до полного обжатия всей длины заготовки за 10 циклов.

7. Измерение диаметра обжимаемого образца штангенциркулем.
8. Суммирование длительности циклов и определение машинного времени обжата заготовки.
9. Повторение п. 4-8 для получения данных серии экспериментов. Для каждого из четырех комплектов бойков (базового, параболического, гиперболического и логарифмического профиля) провести 16 экспериментов по определению усилия деформирования в 10 точках образца.
10. Расчет энергосиловых параметров, в том числе мощности при деформировании заготовок бойками каждого профиля.
11. Обработка результатов эксперимента. Построение графика изменения силы и мощности по времени процесса. Анализ полученных результатов, выводы.

3.2 Статистическая обработка полученных результатов

Для удобства все экспериментальные значения обжата 16 образцов бойками базового исполнения сведены в таблицу 3.3, а получаемые диаметры заготовок — в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Диаметры заготовок после обжата

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	<i>мин</i>	<i>макс</i>
Диаметр, мм	33,8	34	34,2	34,1	33,9	34	34,3	34		
Номер образца	9	10	11	12	13	14	15	16	33,7	34,3
Диаметр, мм	33,9	34,1	34,1	33,9	34,1	34,1	33,7	33,8		

Таблица 3.3 – Результаты эксперимента

Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	203	1,86	1	192	1,78	1	200	1,76
2	434	1,82	2	444	1,81	2	439	1,77
3	551	1,83	3	562	1,74	3	548	1,81
4	564	1,8	4	572	1,83	4	565	1,85
5	571	1,77	5	560	1,65	5	565	1,8
6	562	1,73	6	549	1,72	6	568	1,86
7	551	1,69	7	559	1,83	7	557	1,81
8	563	1,84	8	552	1,86	8	557	1,81
9	339	1,81	9	356	1,8	9	334	1,72
10	116	1,77	10	105	1,71	10	97	1,75
Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	188	1,78	1	196	1,86	1	198	1,85
2	447	1,74	2	436	1,73	2	427	1,74
3	556	1,81	3	551	1,74	3	564	1,83
4	547	1,69	4	555	1,84	4	574	1,89
5	560	1,7	5	563	1,75	5	563	1,72
6	571	1,86	6	550	1,78	6	566	1,86
7	556	1,81	7	556	1,76	7	565	1,84
8	555	1,84	8	567	1,73	8	552	1,77
9	356	1,76	9	334	1,75	9	359	1,85
10	113	1,79	10	101	1,79	10	112	1,81
Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	206	1,76	1	201	1,85	1	203	1,74
2	443	1,86	2	425	1,84	2	434	1,81
3	567	1,78	3	551	1,74	3	562	1,77
4	568	1,73	4	553	1,69	4	573	1,86
5	557	1,73	5	572	1,81	5	554	1,84
6	555	1,74	6	554	1,83	6	569	1,72
7	553	1,81	7	572	1,78	7	566	1,65
8	549	1,85	8	550	1,74	8	571	1,78
9	354	1,8	9	340	1,73	9	362	1,86
10	111	1,73	10	120	1,72	10	103	1,76

Окончание таблицы 3.3

Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	185	1,77	1	198	1,73	1	192	1,78
2	426	1,81	2	425	1,79	2	440	1,86
3	554	1,74	3	570	1,71	3	565	1,82
4	562	1,79	4	555	1,77	4	563	1,83
5	560	1,78	5	548	1,8	5	554	1,79
6	560	1,69	6	565	1,85	6	564	1,83
7	564	1,67	7	573	1,83	7	554	1,86
8	568	1,78	8	565	1,75	8	552	1,72
9	334	1,84	9	352	1,81	9	359	1,74
10	113	1,73	10	108	1,79	10	100	1,85
Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	188	1,76	1	197	1,72	1	195	1,67
2	449	1,85	2	444	1,8	2	436	1,85
3	568	1,84	3	557	1,75	3	560	1,83
4	563	1,73	4	564	1,79	4	565	1,68
5	562	1,82	5	553	1,74	5	551	1,8
6	563	1,8	6	549	1,74	6	554	1,82
7	557	1,78	7	566	1,72	7	554	1,7
8	571	1,82	8	558	1,76	8	565	1,75
9	352	1,83	9	339	1,83	9	343	1,81
10	115	1,79	10	117	1,74	10	114	1,71
Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	мин	макс	мат. ожидание			
1	201	1,69	185	206	196,4			
2	433	1,84	425	449	436,4			
3	572	1,86	548	572	559,9			
4	562	1,78	547	574	562,8			
5	568	1,86	548	572	560,1			
6	550	1,76	549	571	559,3			
7	566	1,84	551	573	560,6			
8	568	1,73	549	571	560,2			
9	353	1,75	334	362	347,9			
10	109	1,74	97	120	109,6			

На рисунке 3.6 представлены верхняя и нижняя границы зарегистрированных усилий деформирования и математическое ожидание, определяемое как

$$\tilde{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (3.1)$$

где n – количество наблюдений;

X_i – значение усилия для i -ого наблюдения.

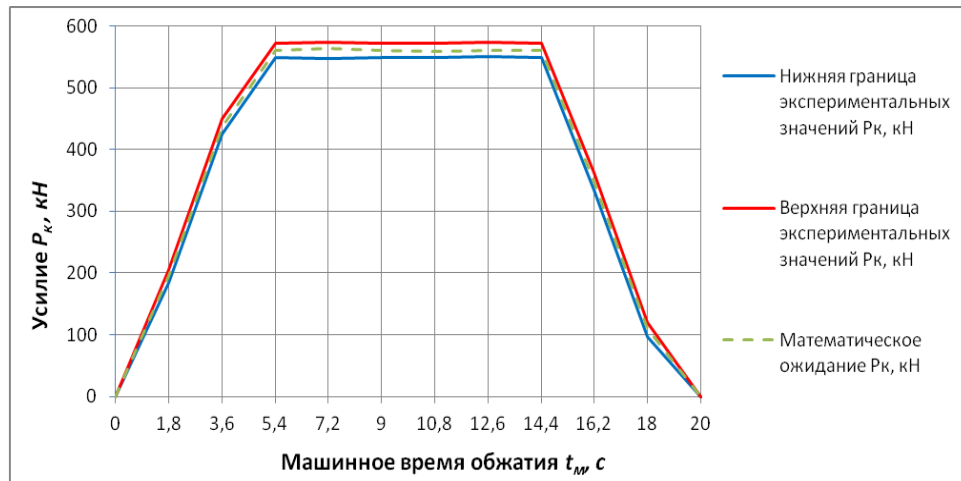


Рисунок 3.6 – Графики результатов обработки усилия деформирования по времени процесса бойками базового исполнения

Выполним проверку нормальности распределения экспериментальных значений усилий в момент времени $t=7,2$ с, т.е. в момент максимального значения наблюдения на диапазоне. Из таблицы 3.2 и рисунка 52 следует, что границы погрешности измерения усилий в этот момент имеют максимальное значение. В соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011 при числе результатов наблюдений $n < 50$ нормальность их распределения проверяют при помощи составного критерия \tilde{d} , равного

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \tilde{A}|}{nS^{\rightarrow}}, \quad (3.2)$$

где S^{\rightarrow} – смещенная оценка среднего квадратичного отклонения, вычисляемая по формуле:

$$S^{\rightarrow} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{A})^2}{n}}. \quad (3.3)$$

Результаты наблюдений группы можно считать распределенными нормально, если

$$d_{1-q_1/2} < \tilde{d} \leq d_{q_1/2}, \quad (3.4)$$

где $d_{1-q_1/2}, d_{q_1/2}$ – квантили распределения, получаемые из [40], причем q_1 – заранее выбранный уровень значимости критерия.

Для удобства вычисления результаты обработки усилия деформирования для $n=16$ сведены в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты обработки усилий в момент $t=7,2$ с

№ n/n	X_i	$ X_i - \tilde{A} $	$(X_i - \tilde{A})^2$
1	564	1,2	1,44
2	572	9,2	84,64
3	565	2,2	4,84
4	547	15,8	249,64
5	555	7,8	60,84
6	574	11,2	125,44
7	568	5,2	27,04
8	553	9,8	96,04
9	573	10,2	104,04
10	562	0,8	0,64
11	555	7,8	60,84
12	563	0,2	0,04
13	563	0,2	0,04
14	564	1,2	1,44
15	565	2,2	4,84
16	562	0,8	0,64
Сумма Σ	9005	85,8	822,44

После подстановки значений в зависимости (3.1)-(3.3) получим:

- математическое ожидание $\tilde{A} = 562,8$;
- смещенная оценка среднего квадратичного отклонения $S^{\rightarrow} = 7,17$;
- составной критерий $\tilde{d} = 0,7480$.

По [39] при числе наблюдений $n=16$ и уровню значимости критерия $q_1 = 0,05$ определяются табличные значения квантилей распределения:

$$d_{q_1/2} = 0,8884 \quad \text{и} \quad d_{1-q_1/2} = 0,7236$$

Сравнивая табличные значения d с рассчитанным \tilde{d} по формуле (3.2), можно убедиться, что условие (3.4) выполняется, т.е. результаты измерений принадлежат нормальному распределению.

Доверительные границы ε (без учета знака) случайной погрешности результата измерения, согласно [39], определяется по формуле:

$$\varepsilon = t \cdot S(\tilde{A}), \quad (3.5)$$

где t – коэффициент Стьюдента, который в зависимости от доверительной вероятности P и числа результатов наблюдений n , находят по [39] для $P=0,95$ и $n=16$ $t=2,145$;

$S(\tilde{A})$ – среднее квадратичное отклонение:

$$S(\tilde{A}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{A})^2}{n-1}}. \quad (3.6)$$

После подстановки в (3.5) и (3.6) значений табл. 3.3 результатов обработки и $n=16$ получим:

$$S(\tilde{A}) = 7,405;$$

$$\varepsilon = 15,883$$

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.736–2011 результаты измерений представляются в форме:

$$X = \tilde{A} + \varepsilon, \quad P, \quad (3.7)$$

где X – усилие обжатия;

P – доверительная вероятность.

Для нашего случая:

$$X = 562,8 \pm 15,88, \quad P = 0,95$$

Проверка воспроизводимости эксперимента выполнена по критерию Кохрена, который основан на законе распределения отношения максимальной оценки дисперсии к сумме всех сравнительных оценок дисперсий, т.е.:

$$G = \frac{\max_q \{S_g^2\}}{\sum_{q=1}^N S_q^2 \{X\}} \quad (3.8)$$

Если вычисленные по (3.8) значения критерия G окажутся меньше критического $G_{кр}$ найденного по таблице [40], гипотеза о воспроизводимости эксперимента принимается.

Для расчета критерия G по (3.8) были определены дисперсии $S_q^2 \{P\}$ для 10 значений соответствующего времени цикла деформирования, равного $t=1,8; 3,6; \dots 18$ с для 16 образцов. Дисперсия $S_q^2 \{P\}$ определялась по известной зависимости [40], как

$$S_q^2 \{P\} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\tilde{A} - P_i)^2, \quad (3.9)$$

где n – количество наблюдений, $n=16$;

A – математическое ожидание, определенное по (3.1);

P_{κ_i} – экспериментальные значения усилия для i -ого наблюдения.

Рассчитанные по (3.9) дисперсии имеют значение:

$S_1 = 36,8$	$S_6 = 59,2$
$S_2 = 62,0$	$S_7 = 47,3$
$S_3 = 56,9$	$S_8 = 61,9$
$S_4 = 54,8$	$S_9 = 93,9$
$S_5 = 48,7$	$S_{10} = 45,1$

Сумма всех дисперсий:

$$\sum_{q=1}^{10} S_q^2 \{P\} = 566,6$$

Величина критерия G по (3.8) равна:

$$G = \frac{93,9}{566,6} = 0,1657$$

Табличное значение верхнего предела критерия G при уровне значимости $q = 0,05$, числе степеней свободы для числителя $\nu_1 = 15$ и знаменателя $\nu_2 = 10$ равно $G_{кр} = 0,1671$. И так как $0,1657$ оказался меньше верхнего предела $G_{кр}$, проверка воспроизводимости эксперимента принимается при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Проверка адекватности математического описания данных опыта производилась с использованием F – критерия Фишера, определяемого соотношением:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{вос}^2}, \quad (3.10)$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности, определяемая по зависимости:

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{N-d} \sum_{q=1}^N (\tilde{A} - P_x)^2,$$

N – число точек, в которых определялась математическое ожидание и расчетное значение усилий;

d – число членов аппроксимирующего полинома, $d = 4$;

\tilde{A} – математическое ожидание значения давления по экспериментальным данным;

P_x – расчетное значение давления для соответствующей точки;

$S_{вос}^2$ – оценка дисперсии воспроизводимости отклика.

Для удобства расчета дисперсии адекватности составлена таблица 3.4. После подстановки данных из таблицы 3.6 получим $S_{ад}^2 = 39,5$.

Оценка дисперсии воспроизводимости отклика определяется по рассчитанным ранее дисперсиям для 10 положений образца, как

$$S_{вос}^2 \{P\} = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N S_q^2 \{X\} \quad (3.11)$$

Таблица 3.6 – Расчет дисперсии адекватности

№ точки N	\tilde{A}	P_x	$ \tilde{A} - P_x $	$(\tilde{A} - P_x)^2$
1	196,4	194,36	2,1	4,3
2	436,4	435,82	0,6	0,3
3	559,9	557,41	2,5	6,1
4	562,8	557,41	5,4	29,2
5	560,1	557,41	2,7	7,0
6	559,3	557,41	1,9	3,6
7	560,6	557,41	3,2	9,9
8	560,2	557,41	2,8	7,7
9	347,9	336,4	11,5	131,7
10	109,6	103,51	6,1	37,4
Сумма Σ	4453,1	4414,6	38,6	237,3

Для нашего случая $S_{voc}^2 = 56,7$.

После подстановки вычисленных значений дисперсий в (3.10), определяется критерий Фишера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{voc}^2} \quad (3.12)$$

Пределы $F_{кр}$:

$$v_1 = N - d = 10 - 4 = 6;$$

$$v_2 = N(m - 1) = 10 \cdot 9 = 90$$

При уровне значимости $q = 0,05$ $F_{кр} = 1,65$ и, так как полученное расчетное значение критерия $F = 0,6979$ меньше критического, гипотеза об адекватности математического описания усилий деформирования по опытным данным принимается.

Определим границы в погрешности математического описания на основе зависимости (3.4)

$$\varepsilon = t \cdot S_x, \quad (3.13)$$

где S_x – среднее квадратичное отклонение определенное как

$$S_x = \sqrt{S_{ad}^2}$$

И после подстановки значения дисперсии адекватности в (3.13) получим $S_x = 6,3$.

Значение коэффициента Стьюдента t найдем по [39] для доверительной вероятности $P=0,95$ и числа степеней свободы $n-1=9$, который составляет $t=2,262$. Граница погрешности математического описания будет равна, κH :

$$\varepsilon = 2,262 \cdot 6,3 = 14,25$$

Если учесть, что среднее значение рассматриваемых усилий находится на уровне $562,8 \kappa H$ и симметрично доверительной погрешности, то ее относительная величина будет находиться на уровне:

$$\varepsilon\% = \pm \left(\frac{14,25}{562,8} \right) \cdot 100\% \approx \pm 2,5\%$$

Далее, зная максимальное усилие деформирования по математическому ожиданию (табл. 3.3), рассчитываются остальные параметры: среднее удельное усилие деформирования, полная работа формоизменения и мощность деформирования N по формулам (2.28)-(2.33).

Аналогично обжатию образцов бойками базового исполнения проведено деформирование заготовок бойками с переменным углом заходного конуса (табл. 3.2) и статистическая обработка полученных результатов, которые представлены в Приложении А, а сравнительная характеристика — в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты эксперимента

<i>Профиль бойка</i> <i>Результаты эксперимента</i>	<i>Базовый</i> <i>($\alpha=const$)</i>	<i>Парабо- лический</i>	<i>Гипербо- лический</i>	<i>Логариф- мический</i>
Число наблюдений n	16	16	16	16
Момент времени деформирования t, c	7,2	7,2	12,6	5,4
Математическое ожидание \tilde{A}	562,8	545	430,2	526,7
Смещенная оценка среднего квадратичного отклонения S^{\rightarrow}	7,17	7,72	5,81	6,62

Продолжение таблицы 3.7

Составной критерий \tilde{d}	0,7480	0,8094	0,8797	0,8458
Квантиль распределения $d_{1-q_1/2}$	0,7236			
Квантиль распределения $d_{q_1/2}$	0,8884			
Доверительная вероятность P	0,95			
Коэффициент Стьюдента t	2,145			
Среднее квадратичное отклонение $S(\tilde{A})$	7,405	7,97	6	6,84
Доверительные границы измерений ε	15,88	17,11	12,88	14,67
Результаты измерений X	562,8±15,9	545±17,1	430,2±12,9	526,7±14,7
Максимальная дисперсия $S_q^2\{P\}$	93,9	75,2	42,8	59,1
Сумма дисперсий $\sum S_q^2\{P\}$	566,6	565,5	330,3	408,9
Критерий Кохрена G	0,1657	0,1329	0,1295	0,1444
Критерий Кохрена критический $G_{кр}$	0,1671			
Дисперсия адекватности $S_{ад}^2$	39,5	124,9	10,2	91,7
Оценка дисперсии воспроизводимости отклика $S_{вос}^2$	56,7	56,55	33,03	40,89
Критерий Фишера F	0,6979	2,21	0,3096	2,24
Критерий Фишера критический $F_{кр}$	2,25			
Граница погрешности математического описания ε	±2,5%	±4,6%	±1,7%	±4,1%
Снижение усилия деформирования по сравнению с бойками базового исполнения	—	3,2%	23,6%	6,4%
Среднее удельное усилие деформирования P_{yc} , кН/мм ²	0,6927	0,679	0,6737	0,6851

Площадь проекции очага деформации F_n , мм ²	812,44	802,6	638,55	768,837
Полная работа формоизменения A_n , кН·мм	51881,12	50430,12	42994,07	49402,46
Мощность обжатия N , кВт	0,021617	0,021013	0,017914	0,020584
Снижение мощности деформирования по сравнению с бойками базового исполнения	—	2,8%	17,1%	4,8%

Графики изменения силы P_k и мощности обжатия N по времени процесса t_m приведены на рисунке 3.7.

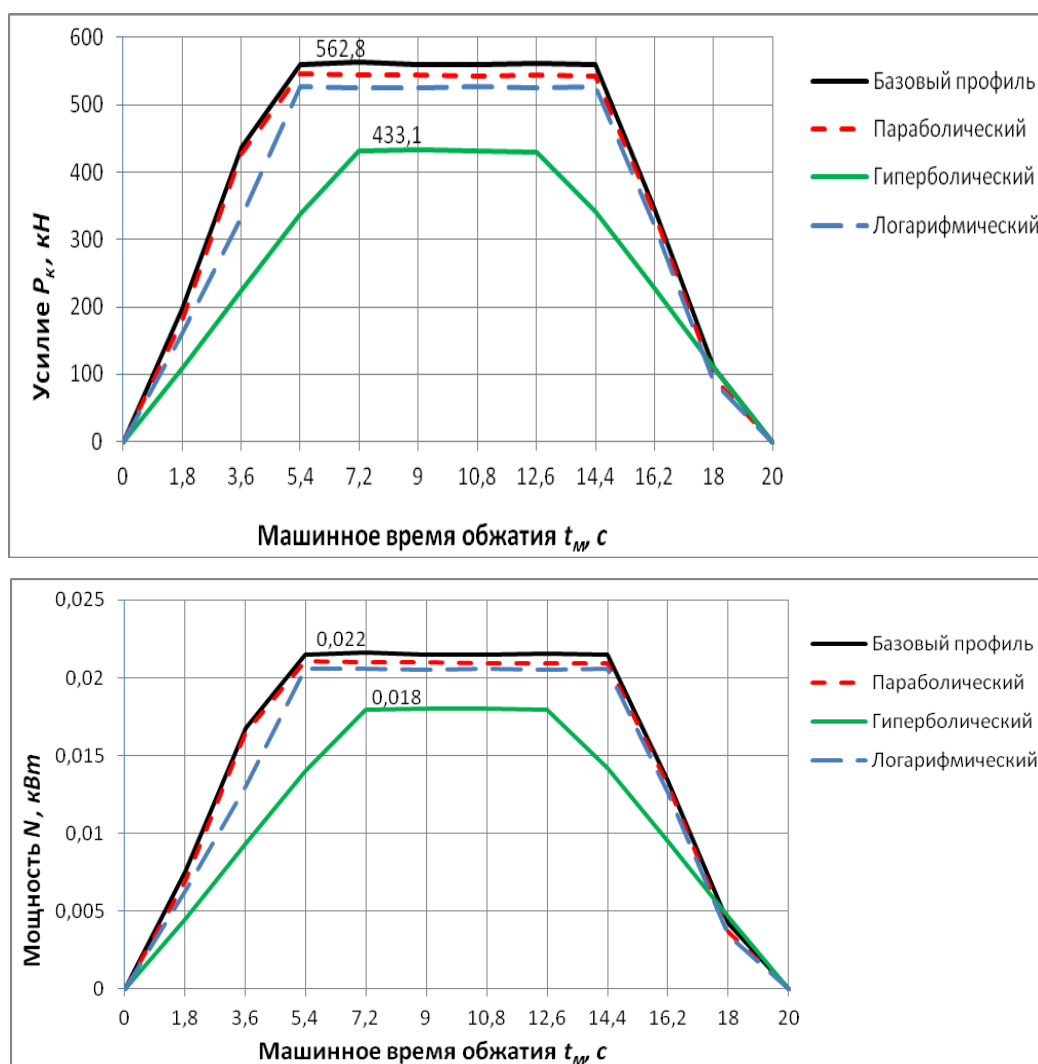


Рисунок 3.7 – Графики изменения силы и мощности деформирования по времени

Обработка экспериментальных и расчетных значений усилий деформирования цилиндрических образцов методами математической статистики показала:

1) экспериментальные значения усилий принадлежат нормальному распределению, границы погрешности результатов измерений при доверительной вероятности равной 0,95 составляют:

- 5...5,7% при обжати бойками базового исполнения;
- 6,3...9,2% при обжати бойками параболического профиля;
- 3,4...6% бойками гиперболического профиля;
- 5,6...8,2% бойками логарифмического профиля;

2) воспроизводимость эксперимента подтверждается критерием Кохрена при уровне значимости 0,05;

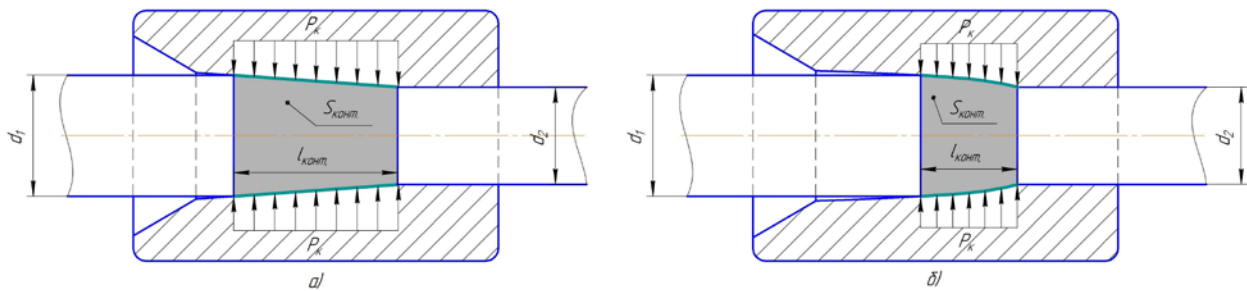
3) адекватность математического описания опытным данным подтверждается критерием Фишера при доверительной вероятности 0,95.

3.3 Выводы по главе 3

Результаты проведенных экспериментов показывают:

1. Применение бойков с переменным углом заходного конуса выпуклого профиля позволяет снизить силу и мощность деформирования цилиндрических заготовок. Наибольшее снижение силы и мощности деформирования достигается обжатием бойками с гиперболическим профилем, при этом усилие снижается на 23,6%, а мощность на 17,1% по сравнению с обжатием бойками базового исполнения, имеющих конический профиль с постоянным углом. Это можно объяснить тем, что при деформировании такими бойками, которые имеют наибольший диапазон изменения угла заходного конуса, достигается максимальное снижение площади контакта заходного участка бойков с заготовкой, что позволяет в процессе обжатия сконцентрировать силовые нагрузки в очаге меньшего объема и сократить потери на трение поверхности

инструмента с заготовкой. К тому же достигается максимальный перенос работы деформирования в основную стадию с установившимся процессом (рисунок 3.8).



P_k – сила обжатия в заходном конусе, $S_{\text{конт}}$ – площадь контакта,

$l_{\text{конт}}$ – длина очага деформаций

Рисунок 3.8 – Контакт заходного участка бойков с поверхностью заготовки:

а) базового исполнения; б) с переменными углами заходного конуса

2. Математическая модель на основе методов пошагового интегрирования с помощью наименьших квадратов, описывающая изменение угла заходного конуса бойка и предела текучести обрабатываемого материала, может быть признана адекватной. Результаты эксперимента подтверждают итоги математического моделирования. Разработанная методика расчета допустима для определения энергосиловых параметров радиального обжатия при деформировании заготовок бойками с переменными углами заходного участка с погрешностью, не превышающей допускаемую, которая в методике Радюченко Ю.С. принята равной $\pm 7,5\%$.

3. Границы погрешности математического описания, рассчитанные по дисперсии адекватности, при уровне значимости 0,05, составляют:

- для бойков базового профиля $\pm 2,5\%$;
- для бойков параболического профиля $\pm 4,6\%$;
- для бойков гиперболического профиля $\pm 1,7\%$;
- для бойков логарифмического профиля $\pm 4,1\%$.

4. Результаты деформирования подлежат нормальному распределению и подтверждаются критериями Кохрена и Фишера для всех типов бойков.

4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В предыдущих главах представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса радиального обжата бойками с переменным углом заходного конуса выпуклого профиля, которые позволили разработать методику расчета энергосиловых параметров при деформировании заготовок инструментом с любой геометрией входной зоны. Полученные результаты послужили основой для разработки бойков с переменным углом заходного конуса и технологических рекомендаций для повышения эффективности радиального обжата. Практическая реализация использована для изготовления заготовки вала, входящего в состав рулевого механизма трактора.

4.1 Анализ базовой технологии получения заготовки

В качестве примера в работе будет рассмотрено применение обжимных бойков с переменным углом заходного конуса для производства поковки вала колонки. Вал изготавливается из качественной конструкционной стали 45 ГОСТ 1050–2013. По своей конфигурации деталь представляет собой тело вращения с небольшими перепадами диаметров ступеней от середины к концам детали.

На базовом предприятии АО "Навлинский завод "Промсвязь" (п. Навля Брянской обл.) в условиях мелкосерийного производства заготовка изготавливается с помощью радиального обжата. Конструктивная форма детали является довольно технологичной при изготовлении заготовки, получаемой методом холодного радиального обжата при снижении серийности выпускаемой продукции. При данных условиях получение заготовок ступенчатых валов с небольшими перепадами диаметров ступеней холодным радиальным обжатием позволяет получить высокую точность размеров, снизить расход материала и объем механической обработки [41].

Проектирование заготовки, получаемой методом холодного радиального обжатия, выполнено по методике, приведенной в [1].

В качестве исходной заготовки используется прокат стальной горячекатаный круглый обычной точности по ГОСТ 2590–2006. По максимальному диаметру детали с учетом припуска на механическую обработку и предельных отклонений прокатного профиля принят круг $\varnothing 37^{+0,4}_{-0,7}$ обычной точности:

$$K_{\text{круг}} \frac{37 - B1 \text{ ГОСТ } 2590 - 2006}{45 \text{ ГОСТ } 1050 - 2013}$$

Исходя из твердости стали 45, допускаемая степень обжатия за один проход без нагрева составляет $\varepsilon = 0,3 \dots 0,5$ [1]. Коэффициент трения μ между заготовкой и инструментом назначается в зависимости от качества поверхности заготовки и рабочей поверхностью бойков. Шероховатость поверхности заходного конуса и заготовки перед обжатием назначены соответственно $Ra = 1,25 \text{ мкм}$ и $Ra = 20 \text{ мкм}$. При данных качествах поверхностей коэффициент трения принят равным $\mu = 0,15$ для первых двух переходов от исходного прутка и $\mu = 0,1$ для последующих. Шероховатость поверхностей заготовки после обжатия составит $Ra = 3,2 \text{ мкм}$.

Приближенные значения степеней деформаций ε_i по ступеням определяются по формуле (2.27):

$$\varepsilon_i = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1^2},$$

где d_1 и d_2 – диаметры заготовки до и после обжатия соответственно.

с $\varnothing 37$ на $\varnothing 35,5$ $\varepsilon_1 = 0,12$ (правый торец);

с $\varnothing 37$ на $\varnothing 30$ $\varepsilon_2 = 0,427$;

с $\varnothing 37$ на $\varnothing 25$ $\varepsilon_3 = 0,543$.

По величинам переходных степеней деформаций ε_i , коэффициента трения μ и механическим свойствам обрабатываемого материала назначен угол заходного конуса бойка $\alpha = 7^\circ 30'$ для первых трех переходов и $\alpha = 8^\circ$ для последующих (при $\varepsilon \geq 0,5$ и $\mu = 0,1$).

Припуски на механическую обработку и утяжку торцов назначены по справочным данным [1].

Назначена следующая последовательность переходов с определением относительной степени деформации ε_{ni} по этим переходам:

- 1) с Ø37 на Ø36,25 $\varepsilon_{n1} = 0,04$;
- 2) с Ø37 на Ø31 $\varepsilon_{n2} = 0,298$;
- 3) с Ø36,25 на Ø31 $\varepsilon_{n3} = 0,269$;
- 4) с Ø31 на Ø28,5 $\varepsilon_{n4} = 0,155$ (правая ступень);
- 5) с Ø31 на Ø28,5 $\varepsilon_{n5} = 0,155$ (левая ступень).

Фактическая относительная степень деформации по переходам:

- 1) с Ø37 на Ø36,25 $\varepsilon_1 = 0,04$;
- 2) с Ø37 на Ø31 $\varepsilon_2 = 0,298$ (левая ступень);
- 3) с Ø37 на Ø31 $\varepsilon_3 = 0,298$ (правая ступень);
- 4) с Ø37 на Ø28,5 $\varepsilon_4 = 0,407$ (правая ступень);
- 5) с Ø37 на Ø28,5 $\varepsilon_5 = 0,407$ (левая ступень).

При обжати на двух последних переходах фактическая степень деформации ε_4 и ε_5 приближается к максимально допускаемой (для стали 45 $\varepsilon_{max} = 0,3...0,5$ [1]), в связи с чем, после третьего перехода выполняется промежуточная термообработка — отжиг для снятия остаточных напряжений.

При разработке технологии получения заготовок радиальным обжатием при мелкосерийном производстве необходимо руководствоваться следующими факторами [1, 2, 13, 42]:

1. Использование минимального количества требуемого количества комплектов обжимных бойков.
2. Обеспечение максимально возможного коэффициента использования металла.

С целью повышения технологичности заготовки и сокращения необходимого количества технологической оснастки принято решение: переходы деформирования правых и левых ступеней на Ø31 и Ø28,5 мм выполняются одинаковыми бойками.

Объем поковки определен путем построения трехмерной модели в САПР Компас 3D, который составляет $V = 506625 \text{ мм}^3$ (масса $3,96 \text{ кг}$). Эскиз поковки с нумерацией переходов по ступеням представлен на рисунке 4.1.

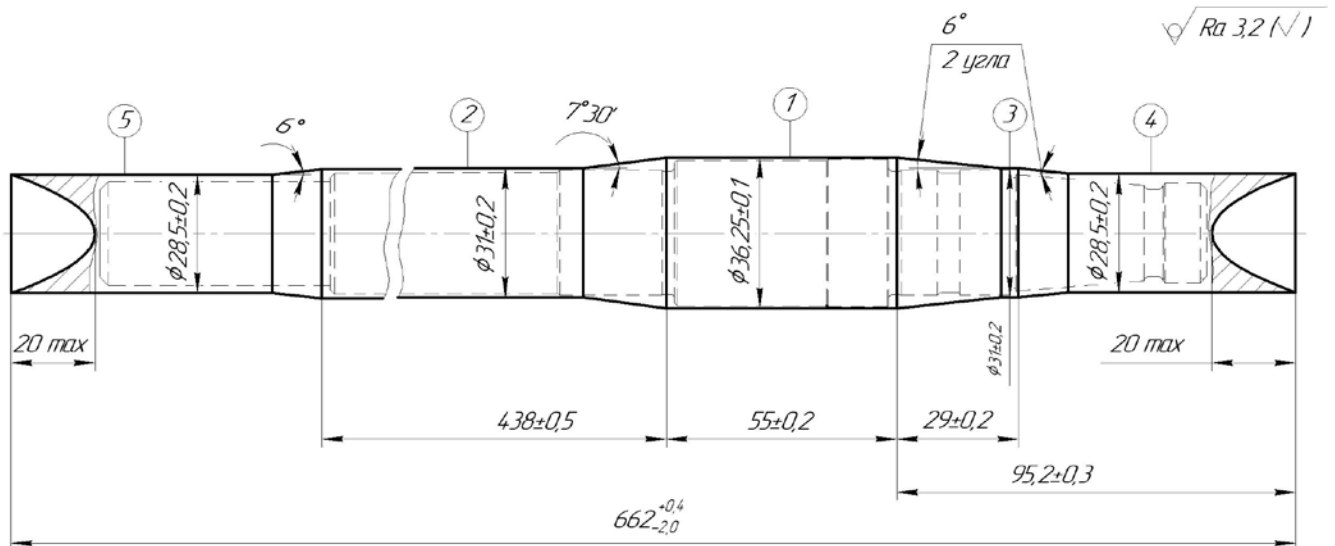


Рисунок 4.1 – Эскиз поковки вала

Длина исходной заготовки вычисляется по формуле (2.22) [1], мм:

$$l_3 = \frac{V}{0,785 \cdot d_{\max}^2} = \frac{506625}{0,785 \cdot 37^2} \approx 471$$

Длина обжимаемых частей заготовки по переходам: $l_{01} \approx 116 \text{ мм}$; $l_{02} \approx 355 \text{ мм}$; $l_{03} \approx 66 \text{ мм}$; $l_{04} \approx 57 \text{ мм}$; $l_{05} \approx 64 \text{ мм}$. Последовательность переходов раздельного радиального обжатия поковки вала приведена в таблице 4.1.

4.2 Конструкция бойков базового исполнения

Для деформирования заготовки используются комплекты бойков (табл. 4.1), которые разработаны по методике, приведенной в [1]. Самым энергозатратным является второй переход с наибольшей относительной степенью деформации $\varepsilon_{n2} = \varepsilon_{\max} = 0,298 \approx 0,3$. Эскиз и трехмерная модель бойка базового исполнения, который применяется на этом переходе, представлен на рисунке 4.2. В качестве материала используется инструментальная легированная сталь 5ХНВ ГОСТ 5950–

2000, твердость рабочей поверхности HRC 55...64. Данная сталь широко используется для изготовления инструментов, работающих в условиях ударных нагрузок и высоких температур, в том числе штамповой оснастки.

Таблица 4.1 – Последовательность переходов обжатия вала колонки

№ пере- хода	Эскиз заготовки перед обжатием	Эскиз поковки после обжатия	Номер комплекта бойков
1			№1
2			№2
3			
4			№3
5			
Примечание: * – размеры для справок			

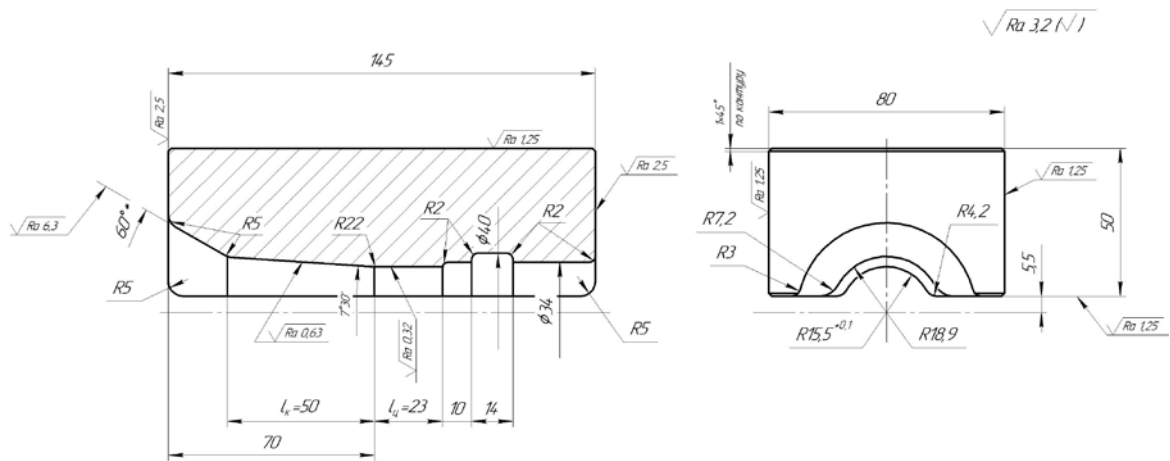


Рисунок 4.2 – Эскиз бойка базового исполнения

Основные конструктивные размеры бойков базового исполнения приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Конструктивные элементы бойков базового исполнения

Конструктивный элемент	Значение
Угол заходного конуса α	7°30'
Угол охвата заготовки бойками θ	118°
Длина заходного конуса l_k , мм	50
Длина калибрующего участка $l_{ц}$, мм	23
Длина контакта заготовки с заходным конусом бойка $l_{конт}$, мм	45,77
Соотношение длин $\frac{l_{ц}}{l_k}$	0,46
Радиус сопряжения конического и цилиндрического участков ручья бойка r_n , мм	21,7
Радиусы сопряжений профиля $r_{ц}$ и r_k , мм, соответственно	4,2 и 7,2
Закрытая высота ручья бойков до обработки h_0 , мм	11
Длина бойка L , мм	145
Количество бойков в комплекте, шт.	2

В качестве оборудования применяется ротационно-обжимная машина В2226. Режимы деформирования и параметры процесса представлены в таблице 4.3.

Цель замены базовых бойков бойками с переменным углом заходного конуса будет заключаться в снижении требуемой силы и мощности деформирования. Затем, исходя из результатов расчета энергосиловых

параметров процесса по методике, приведенной в п. 2.5, и аналогично расчетам эксперимента в п. 3.2, будет выбран один комплект инструмента с наибольшим снижением энергозатрат. Следовательно, использование бойков с переменным углом заходного конуса выпуклого профиля на втором переходе даст наибольшую экономию электроэнергии.

Таблица 4.3 – Режимы деформирования по базовой технологии

<i>Параметр процесса</i>	<i>Значение</i>
Начальный диаметр заготовки d_1 , мм	37
Конечный диаметр заготовки d_2 , мм	31
Шаг подачи заготовки S , мм на обжатие	0,8
Число оборотов обоймы сепаратора обжимного механизма n , об/мин	40
Число опорных роликов в сепараторе обжимного механизма, шт.	12
Коэффициент трения между поверхностью заготовки и инструментом μ	0,15
Коэффициент скольжения сепаратора с обоймой обжимного механизма f	1,0
Материал бойков	Сталь 5ХНВ ГОСТ 5950–2000
Обрабатываемый материал	Сталь 45 ГОСТ 1050–2013
Предел текучести стали 45 в состоянии поставки σ_t , МПа	355
Относительная степень деформации на переходе ε	0,3
Усилие деформирования базовыми бойками P_k , кН	1375
Расходуемая мощность N , кВт	6,2
Площадь контакта заходной части бойков с поверхностью заготовки S , мм ²	3926

4.3 Проектирование бойков с переменным углом заходного конуса

Проектируемые бойки от бойков базового исполнения будут различаться геометрией заходной части (рисунок 4.3). При проектировании входной зоны приняты формы поверхности и рекомендации, изложенные в п. 2.2. Для создания профиля используются следующие функции: квадратичная вида $y = 0,5x^2$,

функция обратной пропорциональности $y = \frac{1}{x}$ и функция натурального логарифма $y = \ln x$.

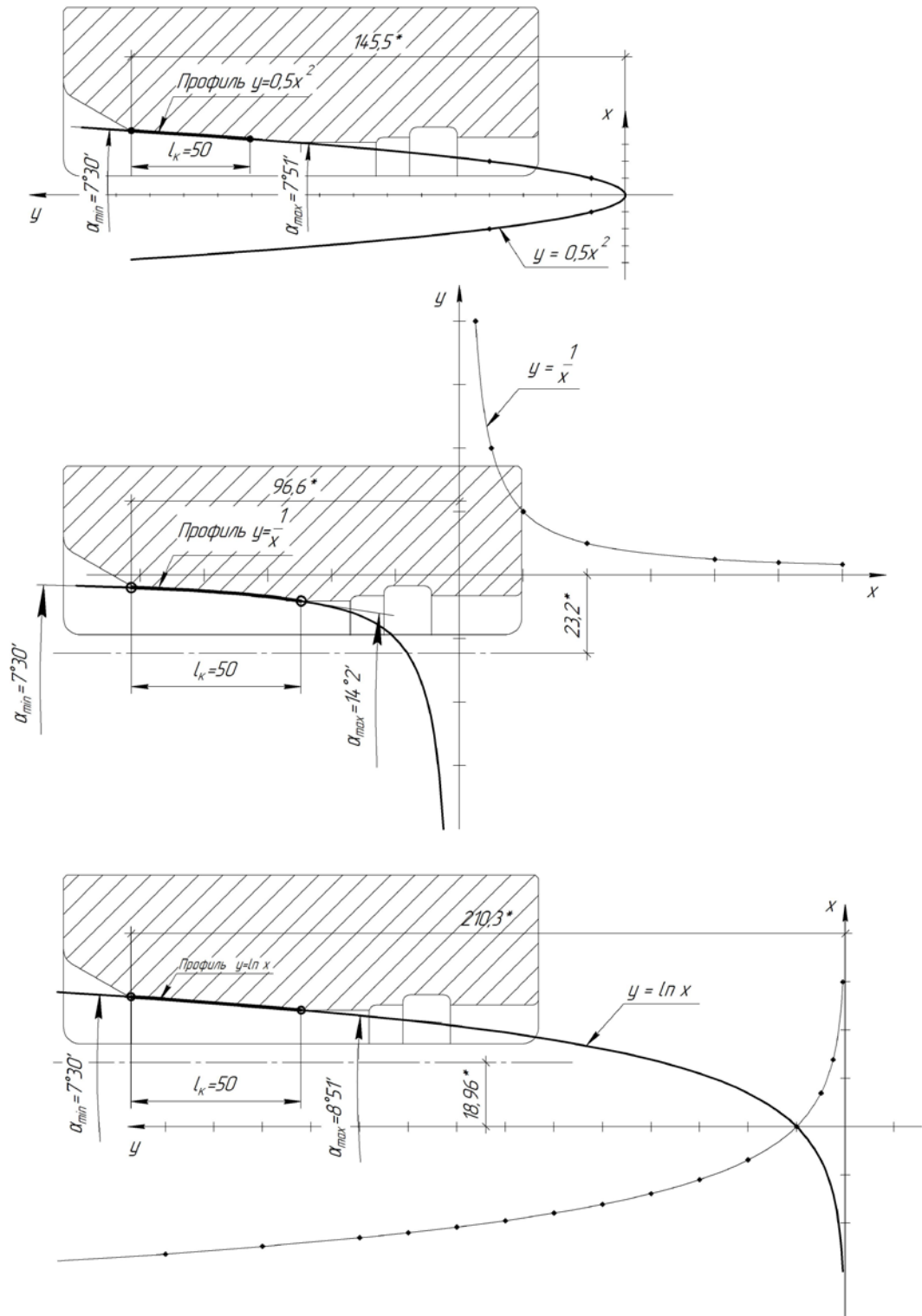


Рисунок 4.3 – Участки графиков математических функций, образующие профиль заходных участков бойков $\alpha_{\min} = 7^\circ 30'$, $l_k = 50$ мм; $d_2 = 31$ мм

Кривые данных функций будут давать наиболее плавное изменение конусности. Угол заходного конуса в начальной точке принимается таким же, как и для бойков базового исполнения $\alpha_{min} = 7^\circ 30'$. Длина заходного участка принимается аналогично базовой конфигурации $l_k = 50$ мм. Угол заходного конуса в конечной точке α_{max} определяется геометрическими построениями профиля в САПР КОМПАС 3D (рисунок 4.3).

Наложение кривой функции на рабочий профиль бойка схематически показано на рисунке 4.4.

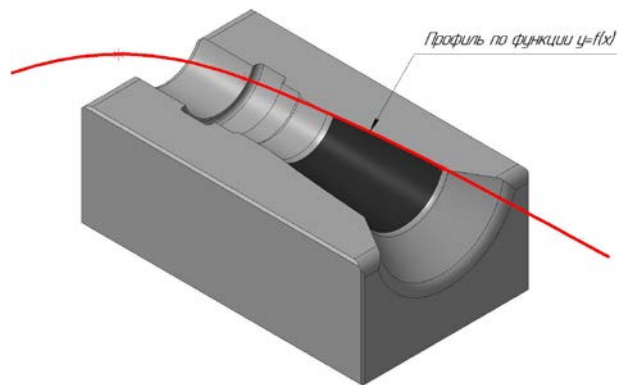


Рисунок 4.4 – Формирование профиля заходного участка бойка по математической функции

Расчет конструктивных элементов бойков с переменным углом заходного конуса аналогично бойкам базового исполнения выполнен по методике, приведенной в [1].

Учитывая твердость обрабатываемого материала, угол охвата заготовки бойками θ принят 118° . Так как $\alpha = 7^\circ 30'$ и $\varepsilon = 0,3$, оптимальное соотношение длин калибрующего и заходного участков составляет $\frac{l_y}{l_k} \leq 0,5$ [1]. Минимально рекомендуемая длина заходного конуса определяется по рекомендациям, приведенным в [1], мм:

$$l_k = \frac{d_1 - d_2}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{37 - 31}{2 \operatorname{tg} \frac{7^\circ 30'}{2}} \approx 45,8$$

Окончательно принято $l_k = 50$ мм. Длина калибрующего участка будет принята исходя из соотношения $\frac{l_u}{l_k} \leq 0,5$ и фактической длины контакта инструмента с заготовкой $L_{\text{конт}}$, которую можно определить графически (рисунок 4.5).

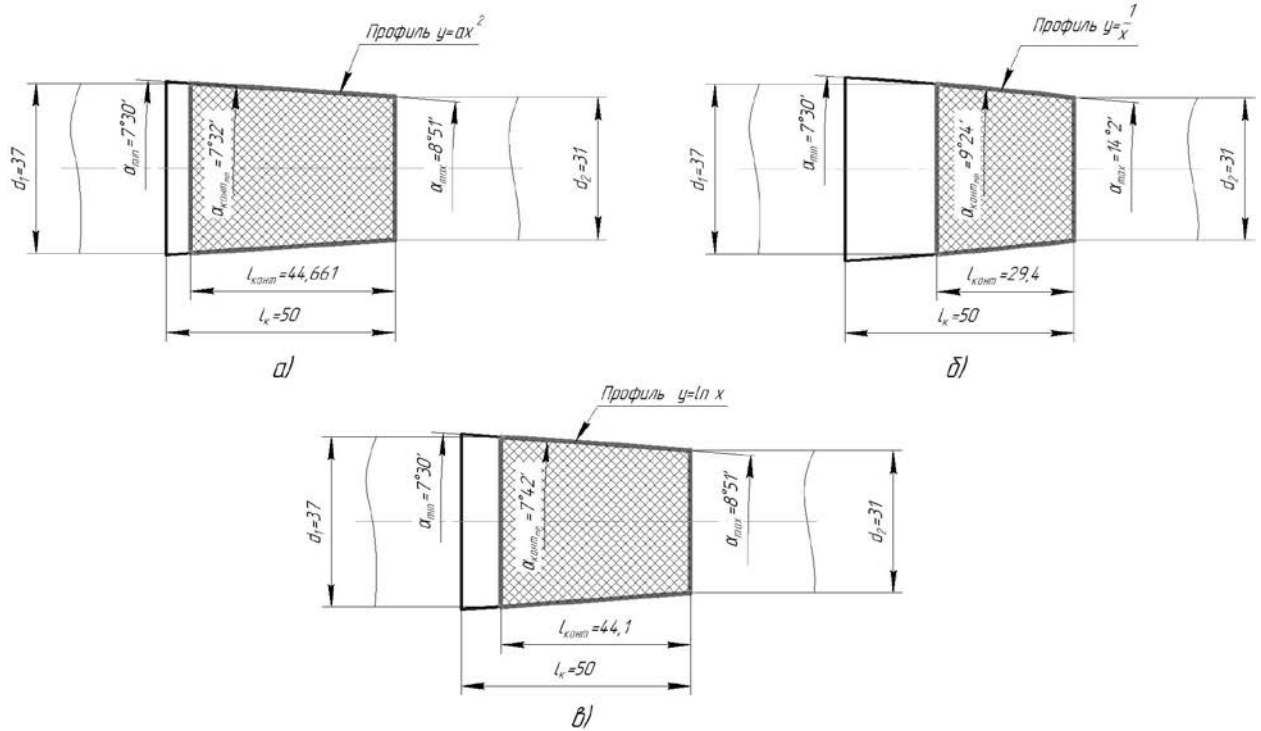


Рисунок 4.5 – Определение длины контакта инструмента с заготовкой $L_{\text{конт}}$ (полный объем обжимаемого металла в заходном конусе выделен штриховкой) для бойков различного профиля: а) параболического; б) гиперболического; в) логарифмического

Радиусы сопряжений профиля ручья с плоскостью разреза бойков r_u и r_k определяются по формулам:

$$r_u = 0,5 \left(d_2 - \frac{\Delta + 0,5\delta_0}{\sin \frac{\pi - \theta}{2}} \right), \quad r_k = 0,5 \left(d_1 - \frac{\Delta + 0,5\delta_0}{\sin \frac{\pi - \theta}{2}} \right)$$

где Δ – величина упругой деформации механизма обжатия, мм;

δ_0 – зазор между бойками при холостом ходе, мм. Принимается $\delta_0 = 0,05d_2$ [1]. Таким образом, зазор δ_0 составит, мм:

$$\delta_0 = 0,05d_2 = 0,05 \cdot 31 = 1,55$$

Относительная величина упругой деформации механизма обжатия при данных условиях деформирования, c^{-1} :

$$\frac{\Delta}{F_n} = 0,006, \quad (4.1)$$

где F_n – наибольшая площадь проекции очага деформации, $мм^2$:

$$F_n = \frac{d_1^2 - d_2^2}{4tg \frac{\alpha}{2}} = \frac{37^2 - 31^2}{4tg \frac{7^\circ 30'}{2}} = 1556 \quad (4.2)$$

Величина упругой деформации механизма обжатия Δ , $мм$, определяется из соотношения (4.1):

$$\Delta = 0,006 F_n = 0,006 \cdot 1556 = 9,34$$

Таким образом, радиусы сопряжений профиля r_u и r_k будут составлять, $мм$:

$$r_u = 0,5 \left(31 - \frac{9,34 + 0,5 \cdot 1,55}{\sin \frac{180^\circ - 118^\circ}{2}} \right) = 4,2, \quad r_k = 0,5 \left(37 - \frac{9,34 + 0,5 \cdot 1,55}{\sin \frac{180^\circ - 118^\circ}{2}} \right) = 7,2$$

Радиус сопряжения конического и цилиндрического участков ручья бойка r_n , $мм$, назначается по рекомендациям, приведенным в [1, 43]:

$$r_n = 0,7d_2 = 0,7 \cdot 31 = 21,7$$

Радиус конусной части ручья r_{pk} для плавного захода заготовки принимается в зависимости от начального диаметра обжатия d_1 . Исходя из принятой длины заходного конуса $l_k = 50$ $мм$, геометрическими построениями определено $r_{pk} = 18,9$ $мм$.

Радиус цилиндрической части ручья, $мм$:

$$r_{pu} = 0,5d_2 = 0,5 \cdot 31 = 15,5$$

Закрытая высота ручья бойков h_0 до обработки, $мм$:

$$h_0 = \Delta + \delta_0 = 9,34 + 1,55 = 10,89 \approx 11$$

Рекомендуемая длина бойка L определяется по формуле [1], $мм$:

$$L = 0,5d_1 + (l_k + 0,5l_u) \cdot 2$$

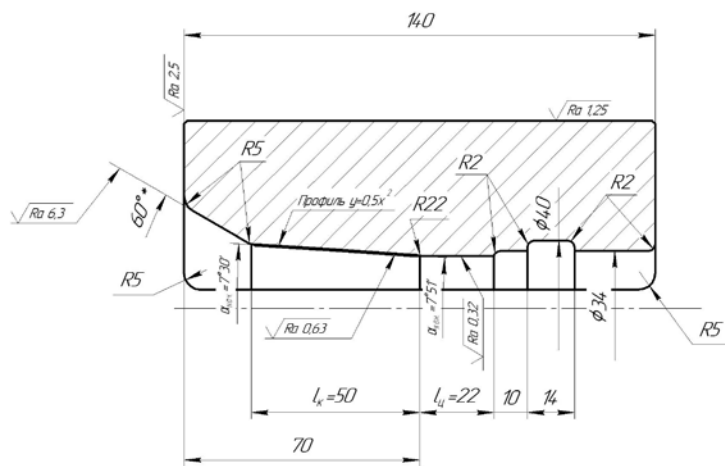
Ширина B и высота H бойков приняты конструктивно аналогично бойкам базового исполнения 80 и 50 мм соответственно.

Как и в базовой конструкции бойков предусмотрен конический вход под углом 60° для плавного захода заготовки в зону деформаций и выемка $\varnothing 40 \times 14$ мм для установки в нее упора, ограничивающего длину обжатия. Основные конструктивные элементы проектируемых бойков приведены в таблице 4.4.

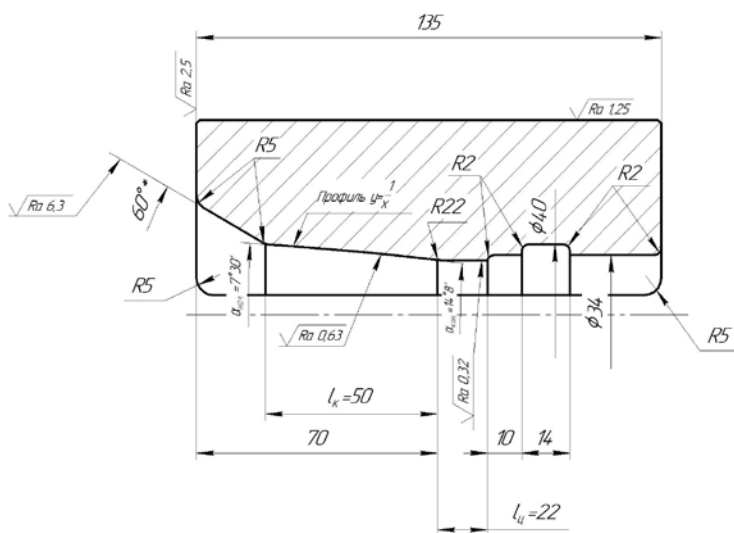
Таблица 4.4 — Основные конструктивные элементы бойков с переменным углом заходного конуса выпуклого профиля

Характеристика (элемент) Тип профиля	Профиль рабочей части		
	Параболический	Гиперболический	Логарифмический
Длина заходного конуса l_k , мм	50		
Угол заходного конуса в начальной точке α_{min}	$7^\circ 30'$		
Угол заходного конуса в конечной точке α_{max}	$7^\circ 50' 37''$	$14^\circ 8'$	$8^\circ 51'$
Длина контакта заготовки с заходным конусом бойка $L_{конт}$, мм	44,7	29,4	41,4
Длина калибрующего участка l_u , мм	22	22	20
Соотношение длин $\frac{l_u}{l_k}$	0,49	0,49	0,48
Диапазон угла заходного конуса, непосредственно контактирующий с заготовкой, $\alpha_{конт}$	$7^\circ 32' 4'' \dots 7^\circ 50' 37''$	$9^\circ 24' \dots 14^\circ 2'$	$7^\circ 42' \dots 8^\circ 51'$
Площадь контакта заходной части бойков с поверхностью заготовки S , мм ²	3838	2634	3574
Общая длина бойка L , мм	140	135	140

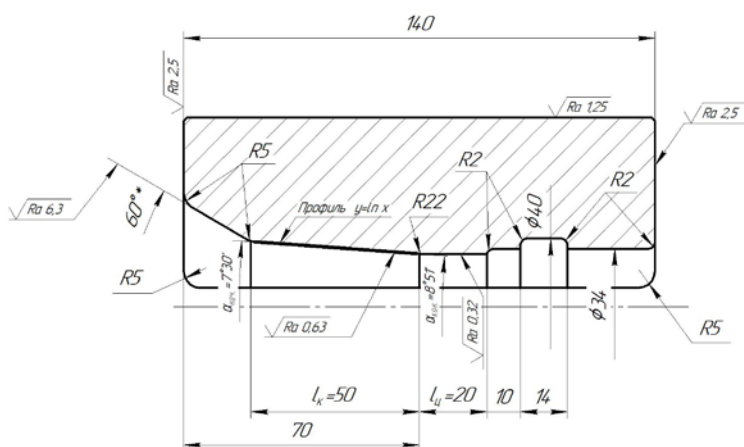
Эскизы спроектированных бойков представлены на рисунке 4.6.



а)



б)



в)

Рисунок 4.6 – Эскизы бойков с различным профилем заходного конуса:

а) параболическим; б) гиперболическим; в) логарифмическим

4.4 Расчет энергосиловых параметров радиального обжатия бойками с переменным углом заходного конуса выпуклого профиля

Определение энергосиловых параметров будет осуществляться по методике, приведенной в п. 2.5. Полное усилие обжатия, расходуемое на деформацию заготовки с учетом соотношения длин $\frac{l_u}{l_k}$, рассчитывается по формулам (2.23)-(2.24). Для расчета диаметра нейтральной поверхности d_0 по номограммам [1] определены коэффициенты изменения трения в процессе деформирования $\nu=1$ и $\xi=0,3$.

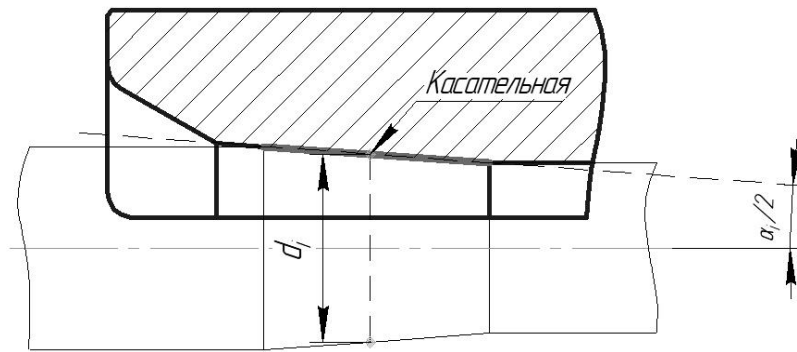
Исходные данные для расчета:

- начальный диаметр $d_1 = 37 \text{ мм}$;
- конечный диаметр $d_2 = 31 \text{ мм}$;
- относительная степень деформации $\varepsilon \approx 0,3$;
- длина исходной заготовки перед обжатием $l_3 = 355 \text{ мм}$;
- общий объем деформируемой заготовки $V = 381492 \text{ мм}^3$;
- машинное время обжатия $t_m = 79,02 \text{ с}$.

Абсолютное обжатие, которое составляет $\Delta d = 6 \text{ мм}$, разделяется на 60 отрезков с шагом приращения $h=0,1 \text{ мм}$.

Шаг обжатия представляет собой деформирование заготовки с начального диаметра d_1 до конечного d_2 , при этом каждый последующий i -ый шаг представляет собой приращение конечного обжимаемого диаметра d_{2i} на $\Delta d = 0,1 \text{ мм}$ в начальной стадии и уменьшение начального d_{1i} на $\Delta d = 0,1 \text{ мм}$ в конечной.

Значение угла α_i в конечной точке i -ого шага при текущем диаметре d_i определяется геометрическими построениями в САПР КОМПАС 3D (рисунок 4.7).

Рисунок 4.7 – Определение угла α_i

Далее, задавшись массивом данных (углов заходного конуса α_i при текущем диаметре d_i из конструкторской документации бойков), рассчитываются энергосиловые параметры процесса при обжатии бойками каждого профиля по разработанной методике по формулам (2.40)-(2.62). Результаты расчетов приведены в Приложении Б, а основные характеристики — в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Сравнительная характеристика процесса радиального обжатия бойками различного профиля

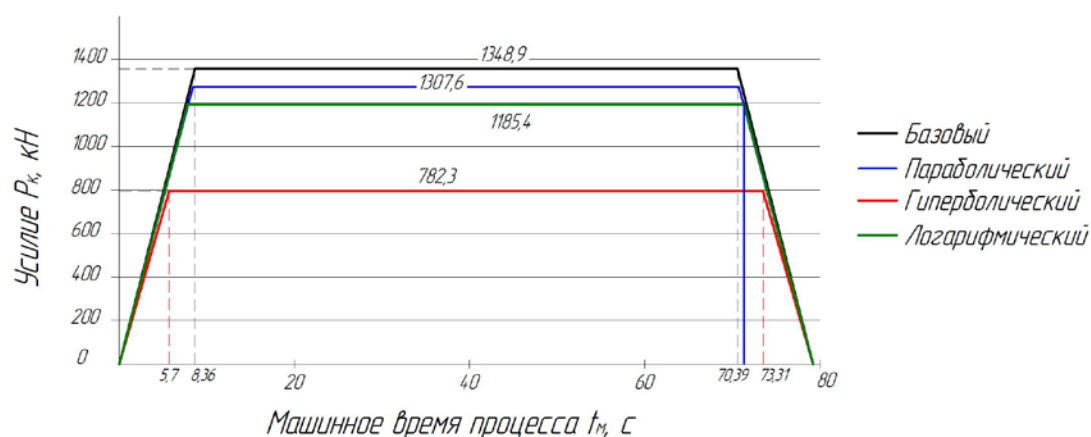
Профиль бойков	Характеристика	Стадии процесса		
		Начальная	Основная	Конечная
Параболический	Угол заходного конуса шага $\alpha_{ш i}$	0,1315... 0,1341	0,1342	0,1342... 0,1369
	Относительная степень деформации ε_i	0...0,293	0,298	0,294...0
	Предел текучести $\sigma_{т ш i}$, МПа	355...731,9	733,9	740,2...856,6
	Диаметр нейтральной поверхности d_{0i} , мм	37...32,81	32,75	32,71...31
	Усилие деформирования $P_{\kappa i}$, кН	0...1280,6	1307,6	1290,8...0
	Площадь проекции очага деформации F_n , мм ²	0...1495,76	0...1518,37	1490,15...0
	Полная работа формоизменения A_i , кН·мм	0...461835	473038	465842...0
	Мощность обжатия N_i , кВт	0...5,85	5,99	5,9...0
	Продолжительность стадии $t_{см i}$, с	8,43	62,15	8,43

Окончание таблицы 4.5

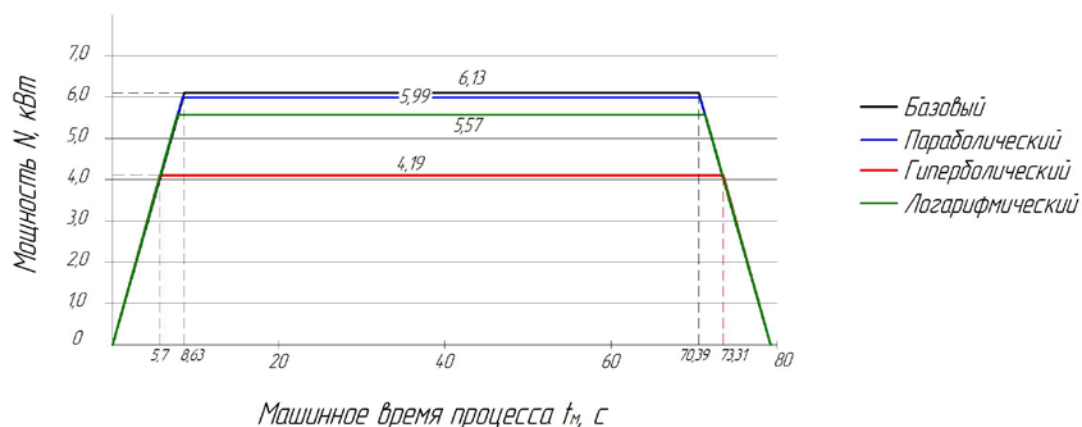
Гиперболический	Угол заходного конуса шага $\alpha_{ш i}$	0,1624... 0,2021	0,2028	0,2035... 0,2433
	Относительная степень деформации ε_i	0...0,293	0,298	0,294...0
	Предел текучести $\sigma_{т ш i}$, МПа	355... 731,9	733,9	740,2...856,6
	Диаметр нейтральной поверхности d_{0_i} , мм	37...32,22	32,15	32,12...31
	Усилие деформирования P_{κ_i} , кН	0...770,3	782,3	771...0
	Площадь проекции очага деформации F_n , мм ²	0...990,32	1002,27	981,15...0
	Полная работа формоизменения A_i , кН·мм	0... 324242	330775	325585...0
	Мощность обжатия N_i , кВт	0...4,11	4,19	4,12...0
	Продолжительность стадии t_{cm_i} , с	5,7	67,61	5,7
Логарифмический	Угол заходного конуса шага $\alpha_{ш i}$	0,1347... 0,1448	0,145	0,1452... 0,1554
	Относительная степень деформации ε_i	0...0,293	0,298	0,294...0
	Предел текучести $\sigma_{т ш i}$, МПа	355... 731,9	733,9	740,2...856,6
	Диаметр нейтральной поверхности d_{0_i} , мм	37...32,72	32,66	32,62...31
	Усилие деформирования P_{κ_i} , кН	0...1162,6	1185,4	1169,2...0
	Площадь проекции очага деформации F_n , мм ²	0... 1384,42	1404,14	1376,87...0
	Полная работа формоизменения A_i , кН·мм	0... 430146	440085	433191...0
	Мощность обжатия N_i , кВт	0...5,45	5,57	5,48...0
	Продолжительность стадии t_{cm_i} , с	7,83	63,35	7,83
Базовый ($\alpha=const$)	Угол заходного конуса шага $\alpha_{ш i}$	0,1309		
	Относительная степень деформации ε_i	0...0,293	0,298	0,294...0
	Предел текучести $\sigma_{т ш i}$, МПа	355... 731,9	733,9	740,2...856,6
	Диаметр нейтральной поверхности d_{0_i} , мм	37...32,84	32,78	32,74...31
	Усилие деформирования P_{κ_i} , кН	0...1320,4	1348,9	1332,2...0
	Площадь проекции очага деформации F_n , мм ²	0... 1532,53	1556,22	1528,03...0
	Полная работа формоизменения A_i , кН·мм	0... 472486	484156	476958...0
	Мощность обжатия N_i , кВт	0...5,98	6,13	6,04...0
	Продолжительность стадии t_{cm_i} , с	8,63	61,76	8,63

Графики изменения усилия деформирования P_k , мощности N , площади контакта заходного конуса бойков с поверхностью заготовки S , диаметра нейтральной поверхности d_0 , предела текучести обрабатываемого материала σ_m , относительной степени деформации ε представлены на рисунке 4.8.

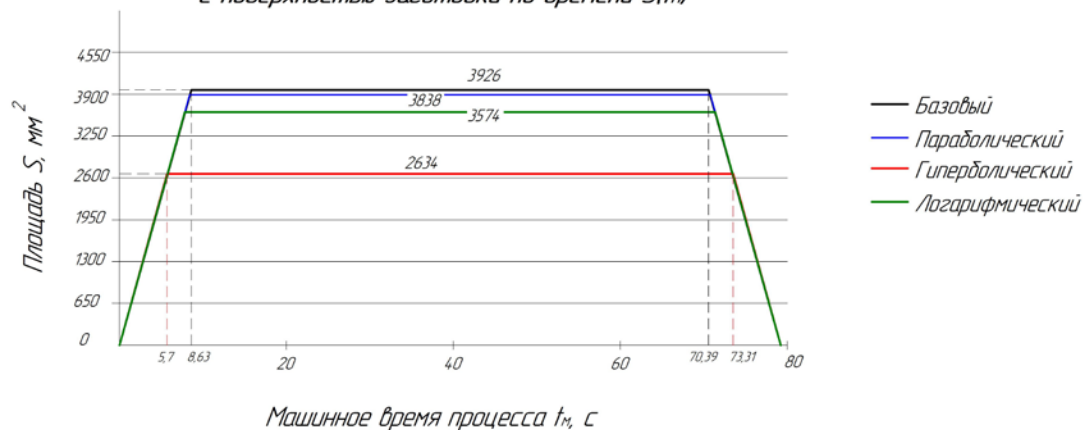
Изменение усилия деформирования по времени $P_k(t_m)$



Изменение расходуемой мощности деформирования по времени $N(t_m)$



Изменение площади контакта заходного конуса бойков с поверхностью заготовки по времени $S(t_m)$



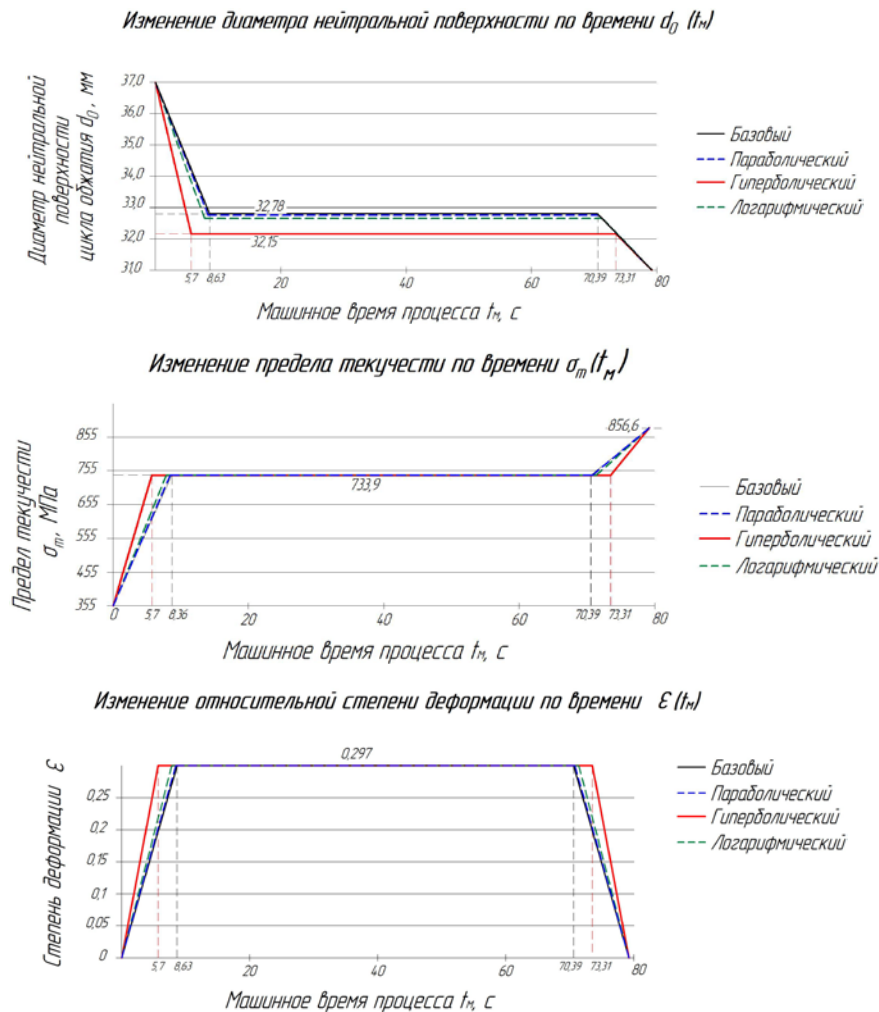


Рисунок 4.8 – Графики изменения основных параметров процесса радиального обжатия бойками различного профиля

Полученные результаты показывают, что применение бойков с переменным углом заходного конуса, имеющих выпуклый профиль, позволяет снизить силу и мощность деформирования. При обжатии данными бойками уменьшается объем деформируемого металла в начальной и конечной стадии, а также их длительность. Это положительно сказывается на равномерности деформаций за счет максимального переноса работы формоизменения в основную стадию с установившимся процессом, что дает более равномерное нагружение как инструмента, так и обжимного механизма [1, 19, 23, 44]. При этом сокращение площади контакта заходного конуса обжимных бойков с поверхностью заготовки позволяет в процессе обжатия сконцентрировать силовые нагрузки в очаге меньшего объема и сократить потери на трение.

Наибольшее снижение силы и мощности деформирования наблюдается при обжатии бойками с гиперболическим профилем за счет:

1. Рационального профиля заходного участка с наибольшим диапазоном изменения угла заходного конуса. Расчеты и моделирование показывают снижение площади проекции очага деформации, при этом мощность процесса снижается примерно так же, как и площадь контакта заходного участка бойка с заготовкой. Таким образом, снижение площади контакта положительно сказывается на концентрации деформаций в очаге формоизменения.

2. Максимального переноса работы деформирования в основную стадию с установившимся характером процесса.

3. Сокращения неравномерности деформаций в начальной и конечной стадии.

Таким образом, применение бойков с гиперболическим профилем дает наибольшее снижение энергозатрат с обеспечением заданных чертежом технических требований изделия.

4.5 Технико-экономическая оценка

Разработанные бойки с гиперболическим профилем входной зоны апробированы в условиях промышленного производства заготовки детали «Вал колонки» на предприятии АО "Навлинский завод "Промсвязь" (рисунок 4.9).



Рисунок 4.9 – Комплекты изготовленных бойков с гиперболическим профилем заходного конуса (слева) и базового исполнения (справа)

Комплект разработанных бойков используется на втором и третьем переходах обжатия (таблица 4.1). По сравнению с базовой технологией в калькуляции себестоимости поковки изменятся затраты на электроэнергию и изготовление инструмента. Следовательно, расчет экономической эффективности предлагаемыми бойками будет рассчитан по изменяемым статьям затрат для базовой и предлагаемой технологии. Исходные данные для расчета приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Основные технико-экономические показатели радиального обжатия

Переход (табл.4.1)	Показатель	Комплект бойков	
		Базовый	Гиперболический
№2	Усилие деформирования P_{02} , кН	1348,9	782,3
	Мощность обжатия N_{02} , кВт	6,13	4,19
	Машинное время обжатия $t_{м02}$, мин.	1,32	
№3	Усилие деформирования P_{03} , кН	1100	650
	Мощность обжатия N_{03} , кВт	0,9	0,6
	Машинное время обжатия $t_{м03}$, мин.	0,24	

Затраты на технологическую электроэнергию для одной детали определяются по формуле:

$$Q = N_{э} \cdot Ц_{э} \cdot t_m,$$

где $N_{э}$ – потребляемая мощность оборудования, кВт.

$Ц_{э}$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии. На базовом предприятии $Ц_{э} = 8,97$ руб/кВт·ч;

где t_m – машинное время деформирования. Суммарно на двух переходах $t_m = 1,55$ мин.

Затраты на инструмент при деформировании одной детали:

$$И = \frac{И_з \cdot t_m}{\eta}$$

где $И_з$ – стоимость инструмента в расчете на одну заготовку (таблица 4.6);

η – стойкость комплекта бойков. На базовом предприятии стойкость была назначена по нормативам [1], и оценивается в 2900 штук. Принимая во внимание одинаковые режимы обработки, материал бойков, а также сниженное усилие деформирования, стойкость инструмента принимается равной $\eta=3000$ штук [19, 23].

Изменяемые статьи затрат из общей калькуляции себестоимости для одной заготовки и общие показатели эффективности сведены в таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Изменяемые статьи затрат на одну заготовку

<i>Вариант бойков</i>	<i>Статьи затрат на одну заготовку</i>	
	<i>Затраты на инструмент И, руб.</i>	<i>Затраты на электроэнергию Q, руб.</i>
Базовый	10,45	4,88
Гиперболический	10,37	3,25
<i>Показатели экономической эффективности</i>		
Снижение затрат электроэнергии на двух переходах, %	33,3	
Снижение себестоимости инструмента, %	0,01	
Общее снижение расходов на электроэнергию, %	5,66	
Общее снижение себестоимости заготовки, %	5,67	

Исходя из расчетов, затраты на электроэнергию на двух переходах снижены на 33,3%, а общая себестоимость заготовки — на 5,67%. Затраты на изготовление новых бойков не превышают расходы на производство базовых.

4.6 Выводы по главе 4

В данной главе приведены результаты практического применения работы, а именно:

1. Разработаны практические рекомендации по повышению эффективности технологий радиального обжатия путем применения бойков с переменным углом

заходного конуса выпуклого профиля. Доказано, что применение данных бойков позволяет снизить усилие и мощность деформирования за счет рациональной геометрии входной зоны, в результате чего сокращается площадь контакта заходного участка бойка с поверхностью заготовки, что положительно сказывается на концентрации деформаций в очаге меньшего объема. При обжатии данными бойками сокращается длительность начальной и конечной стадий с неустановившимся характером деформирования и наблюдается максимальный перенос работы формоизменения в основную стадию.

2. Приведены рекомендации по выбору профиля заходных участков радиально-обжимных бойков. При этом кривые, описываемые параболой вида $y = 0,5x^2$, гиперболой вида $y = \frac{1}{x}$ и функцией натурального логарифма $y = \ln x$ позволяют добиться наиболее плавного увеличения угла конуса к концу заходного участка бойка. При этом гипербола дает максимальное возрастание угла заходного конуса к концу входной зоны бойка.

3. Выполнен расчет энергосиловых параметров радиального обжатия бойками различного профиля по разработанной методике и проведено сравнение полученных результатов с базовой технологией. Результаты показали, что бойки с гиперболическим профилем заходного конуса дают наибольшую эффективность: усилие снижается на 42%, а мощность – на 31,6% по сравнению с обжатием бойками с постоянным углом конуса без потери точности и качества получаемых заготовок за счет:

- рациональной формы заходного участка бойка, который характеризуется наибольшим диапазоном изменения угла α , что позволяет в процессе деформирования сконцентрировать силовые нагрузки в очаге меньшего объема с меньшей площадью контакта заготовки с инструментом;
- максимального переноса работы деформирования в основную стадию с установившимся характером деформирования;
- сокращения неравномерности деформаций в начальной и конечной стадиях.

4. Спроектирован, изготовлен и апробирован комплект радиально-обжимных бойков с гипеболическим профилем заходного конуса для производства заготовки вала колонки. Выполнена технико-экономическая оценка применения бойков с гиперболическим профилем. Себестоимость заготовки снижена на 5,67%, а затраты электроэнергии на 33,3% на двух самых энергозатратных переходах деформирования по сравнению с базовой технологией.

5. Составлен и утвержден акт внедрения результатов работы, а также комплект конструкторской документации бойков с гиперболическим профилем на предприятии АО "Навлинский завод "Промсвязь" (Приложения В и Г соответственно).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная задача, которая заключается в повышении эффективности технологии радиального обжатия и качества изделий путем сокращения энергозатрат процесса за счет оптимизации формы заходного участка деформирующего инструмента. В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. Выполнен анализ существующих разработок в области конструктивных элементов радиально-обжимных бойков, определено влияние их геометрических элементов на показатели процесса радиального обжатия. В результате установлено, что геометрические элементы бойков оказывают значительное влияние на характер протекания процесса и энергосиловые параметры радиального обжатия, при этом угол заходного конуса оказывает наибольшее влияние на процесс деформирования и его энергосиловые параметры.

2. Разработана и исследована математическая модель холодного радиального обжатия сплошных цилиндрических заготовок с помощью пошагового интегрирования по методу наименьших квадратов, численно учитывающая изменение угла заходного конуса бойка и предела текучести обрабатываемого материала по стадиям деформирования. Результаты моделирования позволили разработать научно обоснованную методику расчета энергосиловых параметров радиального обжатия бойками с переменными углами заходного конуса, которая позволяет рассчитать энергосиловые параметры процесса при деформировании заготовок бойками с различной геометрией заходного конуса.

3. Проведены экспериментальные исследования, направленные на проверку полученных результатов математического моделирования. Результаты показывают, что при использовании бойков с переменными углами заходного конуса снижается сила и мощность деформирования по сравнению с обжатием бойками базового исполнения с постоянным углом заходного участка. При этом

наибольшая эффективность достигается при обжати бойками с гиперболическим профилем: усилие снижается на 23,6%, а мощность – на 17,1%. Результаты подтверждаются критериями Кохрена и Фишера и подлежат нормальному распределению для всех типов бойков.

4. Разработаны практические рекомендации по повышению эффективности технологий радиального обжатия путем применения бойков с переменным углом заходного конуса выпуклого профиля. Доказано, что применение данных бойков позволяет снизить усилие и мощность деформирования за счет рациональной геометрии входной зоны, в результате чего сокращается площадь контакта заходного участка бойка с поверхностью заготовки, что положительно сказывается на концентрации деформаций в очаге. При обжати данными бойками сокращается длительность начальной и конечной стадий с неустановившимся характером деформирования и наблюдается максимальный перенос работы формоизменения в основную стадию.

5. Испытаны и внедрены в производство радиально-обжимные бойки с гиперболическим профилем заходного конуса для производства заготовки вала колонки, которые позволяют снизить расходы электроэнергии на 33,3% двух самых энергозатратных переходах формоизменения и снизить общую себестоимость заготовки на 5,67% по сравнению с базовой технологией радиального обжатия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радюченко, Ю.С. Ротационное обжатие / Ю.С. Радюченко. — М.: Машиностроение, 1972. — 176 с., ил.
2. Радюченко, Ю.С. Ротационная ковка / Ю.С. Радюченко. — М.: Машгиз, 1962. — 188 с., ил.
3. Ковка и штамповка на специализированном оборудовании / Б.П. Рудаков, А.Н. Силичев, Е.В. Степанов и др. Под общ. ред. П.В. Камнева и А.П. Атрошенко. — 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1982. — 96 с., ил.
4. Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка. — 2-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Е.И. Семенова. — М.: Машиностроение, 2010. — 720 с., ил.
5. Ковка на радиально-обжимных машинах / В.А. Тюрин, В.А. Лазоркин, И.А. Пospelов и др.; Под общ. Ред. В.А. Тюрина. — М.: Машиностроение, 1990. — 256 с., ил.
6. Боек для радиальной ковки: а.с. 1586839 СССР. №4332205/25-27 / Е.В. Климова, Е.П. Сапуткин, Р.М. Тимергалеев, Г.Т. Александрова; заявл. 23.11.87; опубл. 23.08.90, Бюл. 31. 2 с., ил.
7. Погорильчук, А.Я. Определение оптимальных параметров технологического процесса радиальной ковки / А.Я. Погорильчук // Наука и образование. — 2009. — № 9. — С. 47–56.
8. Дмитриева, А.Я. Определение влияния угла охвата заготовки при радиальной ковке на механические свойства изделия при помощи программного комплекса DEFORM 3D // Инженерные системы — 2010. Труды Международной научно-практической конференции: — М., 2010. — С. 105–110.
9. А.с. 137747 СССР, МПК 49 Н 11. Способ ковки заготовки, например, для инструмента из легированной стали / Г.А. Хасин, В.А. Винкович, Н.П. Яковленкова (СССР). — 637193/25; заявлено. 24.08.59; опубл. 15.08.61, Бюл. 8. — 2 с.

10. Алиев, И.С. Классификация и области применения способов локального ротационного деформирования / И.С. Алиев, В.А. Матвийчук // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. — 2010. — № 1 (22). — С. 137-143.
11. Зверяев, Н.Ф. Вопросы технологии ротационнойковки: труды ЛПИ им. М.И. Калинина / Н.Ф. Зверяев. — М.: Машиностроение, 1965. — № 260. — 250 с., ил.
12. Зверяев, Н.Ф. Напряженное состояние и усилие деформации при ротационнойковке. Обработка давлением: труды ЛПИ им. М. И. Калинина / Н.Ф. Зверяев. — М.: Машиностроение, 1964. — № 238. — 215 с., ил.
13. Любвин, В.И. Обработка деталей редуцированием / В.И. Любвин. — М.: Машгиз, 1979. — 148 с., ил.
14. Чарльз, У. Обработка металлов без снятия стружки / Перевод с англ. В.И. Викулова и А.А. Падогоина. Под ред. и с предисл. А.Ф. Нистратова. — М.: Мир, 1965. — 548 с., ил.
15. А.с. 1549663 СССР, МПК В 21 J 7/16. Способ упрочнения рабочей поверхности ударного инструмента / Р.М. Тимергалеев, Е.П. Сапуткин, А.И. Макаров, Е.В. Климова (СССР). — 4296132/25-27; заявлено 12.08.87; опубл. 15.03.90, Бюл. 10. — 2 с.
16. А.с. 1819727 СССР, МПК В 21 J 13/02, 7/16. Боек радиально-обжимной машины / Е.П. Сапуткин, А.П. Макаров, Р.М. Тимергалеев, В.Н. Шмыков (СССР). — 4917688/27; заявлено 11.03.91; опубл. 07.06.93, Бюл. 21. — 3 с.
17. А.с. 1225664 СССР, МПК В 21 J 7/16. Бойки для радиально-ковочной машины / Е.П. Сапуткин, А.И. Макаров, Р.М. Тимергалеев, Г.А. Кувшинов (СССР). — 3753946/25-27; заявлено 19.06.84; опубл. 23.04.86, Бюл. 15. — 2 с.
18. А.с. 1496894 СССР, МПК В 21 J 7/16. Инструмент для радиальнойковки цилиндрических заготовок / В.А. Тюрин, В.П. Троицкий, А.М. Володин и др. (СССР). — 4296187/25-27; заявлено 12.08.87; опубл. 30.07.89, Бюл. 28. — 2 с.

19. А.с. 1590187 СССР, МПК В 21 J 13/02. Бойки для ротационного обжатия / И.Г. Трофимов, В.Л. Боев, А.М. Меркулов и др. (СССР). — 4392069 / 25-27; заявлено 15.03.88; опубл. 07.09.90, Бюл. 33. — 2 с.

20. А.с. 1047572 СССР, МПК В 21 J 7/16. Бойки для радиально-ковочной машины / Е.П. Сапуткин, А.И. Макаров, В.К. Пономарев, И.Б. Покрас (СССР). — 2960864/25-27; заявлено 14.07.80; опубл. 15.10.83, Бюл. 38. — 2 с.

21. А.с. 654345 СССР, МПК В 21 J 13/02; В 21 J 7/16. Инструмент для ротационнойковки / В.М. Изотов, В.Г. Ярцев, В.А. Петров и др. (СССР). — 2559202/25-27; заявлено 26.12.77; опубл. 30.03.79, Бюл. 12. — 2 с.

22. Сережкин, М.А. Совершенствование технологического процесса вытяжки деталей из алюминиевого сплава АД1: дис. канд. техн. наук: 05.02.09 / Сережкин Михаил Александрович: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. — М., 2018. — 137 с.

23. А.с. 233412 СССР, МПК В 23К кл. 49h, 3/02. Бойки для ротационного обжатия / Ю.С. Радюченко, Н.Т. Деордиев (СССР). — 1089888/25-27; заявлено. 08.07.66; опубл. 18.12.1968, Бюл. 2. — 2 с., ил.

24. Деордиев, Н.Т. Исследование силовых параметров процесса холодного ротационного обжатия: сборник ЭНИКМАШ (№ 260) / Н.Т. Деордиев, Ю.С. Радюченко. — М.: Машиностроение, 1971. — 341 с., ил.

25. Радюченко, Ю.С. Исследование влияния элементов геометрии бойков на процесс ротационного обжатия: сборник ЭНИКМАШ «Разработка и исследование технологических процессов обработки металлов давлением» (№ 19) / Ю.С. Радюченко. — М.: Машиностроение, 1968. — 214 с., ил.

26. Столбовский, А.В. Математическое моделирование процессов в материаловедении с использованием MS Excel: учебное пособие / А.В. Столбовский, М.Л. Лобанов. — Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. — 96 с.

27. Буйначев, С.К. Применение численных методов в математическом моделировании: учебное пособие / С.К. Буйначев. — Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. — 70 с.

28. Власов, А.В. Влияние параметров процесса радиальнойковки на механические свойства изделия / А.В. Власов, А.Я. Дмитриева // Будущее машиностроения России. Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов: сборник статей. — М., 2010. — С.56–58.

29. NTN-SNR ROULEMENTS 2017. Подшипники: каталог продукции, 2017. — Режим доступа: [NTN SNR: Manufacturer of bearings, linear modules, rollers and suspension for the industry \(ntn-snr.com\)](http://ntn-snr.com).

30. Плотников, А.А. Управление качеством микровыглаживания регулированием кривизны рабочего профиля инструмента по логарифмической спирали / А.А. Плотников // Механика и технология материалов и конструкций. Вестник ПГТУ №11. — Пермь: ПГТУ. — 2011. — С. 52–59.

31. А. с. 1699761 А1 СССР, МПК В 24 В 39/04. Инструмент для поверхностного деформирования / А.А. Плотников, Г.В. Плотникова (СССР). — 4714308/27; заявл. 31.05.89; опубл. 23.12.91, Бюл. № 47. — 6 с.

32. А. с. 534261 СССР, МПК В 21 В 21/02. Технологический инструмент стана холодной прокатки труб / В.Г. Миронов, Б.Я. Митберг, В.А. Алешин, Я.Ф. Райт, С. А.-Ш. Шайкевич (СССР). — 2117733/02; заявл. 28.03.75; опубл. 26.02.77, Бюл. № 41. — 3 с., ил.

33. Емельянов, С.Г. Использование гиперболических фрез для предварительной обработки рельсов / С.Г. Емельянов, С.А. Чевычелов // Сб. трудов III МНТК «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» — Курск: КурскГТУ. — 2005. — С. 16–20.

34. Емельянов С.Г. Способ формирования профиля головки рельсов профильными фрезами, оснащенными сменными многогранными пластинами, и фрезы для профильной обработки рельсов / С.Г. Емельянов, С.А. Чевычелов // Патент № RUS 2291929. Опубликовано: 20.01.2007. Бюл. №2.

35. Емельянов, С.Г. Разработка САПР гиперболоидных фрез для обработки эвольвентных профилей / С.Г. Емельянов, С.А. Чевычелов, П.П. Чистяков // Справочник. Инженерный журнал с приложением. — 2014. — № 4 (205). — С. 42–46.

36. Витренко, В.А. Исследование процесса изготовления и использования гиперболоидной многозаходной фрезы / В.А. Витренко, В.В. Белозёрова // Научные работы Донецкого национального технического университета. Серия: Машиностроение и машиноведение. — Донецк: ДонНТУ, 2006. — № 110. — С. 49–52.

37. Процесс изготовления и применения гиперболоидного многозаходного инструмента / А. В. Витренко, А. А. Ефимов, А. Д. Михайлова, С. В. Шевченко // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. — 2019. — №12 (30). — С. 36–39.

38. Загиров, Н.Н. Теория обработки металлов давлением: Конспект лекций и варианты заданий для выполнения курсовой работы [Текст] / Сост. Н.Н. Загиров, Э.А. Рудницкий. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. — 56 с.

39. ГОСТ Р 8.736–2011 Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1045-ст: дата введения 2013-04-01. — Москва: Стандартинформ, 2019. — 26 с. – Текст: непосредственный.

40. Спирин, Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: конспект лекций (отдельные главы из учебника для вузов) / Н.А. Спирин, В.В. Лавров и др.; под общ. ред. Н.А. Спирина. — Екатеринбург, 2004. — 257 с. Режим доступа: <http://window.edu.ru/resource/524/28524/files/ustu131.pdf> . — Загл. с экрана.

41. Оценка эффективности радиального обжата для получения заготовок ходовых винтов / Бабичев И.Л., Кучма С.Н., Низмеев А.А., Стародубов С.Ю. // Сборник научных работ студентов ДонГТУ. Вып. 10 Часть I. — Алчевск: ГОУВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. — С.157–162.

42. Радюченко, Ю.С. Комплексное решение вопросов развития технологии и оборудования для радиального обжата / Ю.С. Радюченко // Кузнечно-штамповочное производство. — 1987. — № 6. — С. 2–5.

43. Любвин, В.И. Обработка деталей ротационным обжатием / В.И. Любвин. — М.: Машгиз, 1959. — 172 с., ил.
44. Лялин, В.М. Исследование силовых характеристик высокоскоростного холодного радиального обжатия трубной заготовки из конструкционной легированной стали / В.М. Лялин, Р.А. Сидоров, С.М. Зыков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2020. — Вып. 11. — С. 436–441.
45. Ширинкин, Л.В. Технологические возможности и область применения радиально-обжимных машин / Л.В. Ширинкин // Кузнечно-штамповочное производство. — 1987. — № 6. — С. 6–7.
46. Подрабинник, И.М. Современные кузнечно-прессовые машины больших усилий: обзор. — М.: НИИмаш., 1979. — С. 33–35.
47. Манегин, Ю.В. Освоение технологии радиальнойковки на машине РКМ усилием 10000 кН / Ю.В. Манегин, В.Н. Степанов, Ю.Ф. Лузин // Кузнечно-штамповочное производство, 1981. — № 10. — С. 17–20.
48. Любвин, В.И. Обработка металлов радиальным обжатием. / В.И. Любвин. — М.: Машиностроение, 1975. — 248 с.
49. Штрымов, А.И. Изготовление поковок ступенчатых валов и осей на радиально-ковочных машинах / А.И. Штрымов, Л.М. Суслов, Т.В. Липилина // Кузнечно-штамповочное производство. — 1972. — № 6. — С. 46–47.
50. Зимин, А.М. О перспективах развития кузнечно-прессового оборудования для точной объемной штамповки / А.М. Зимин, Н.А. Зимин // Кузнечно-штамповочное производство. — 1972. — № 8. — С. 36–39.
51. Охрименко, Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Я.М. Охрименко. — М.: Машиностроение, 1976. — 560 с.
52. Алиев, И.С. Факторы, влияющие на параметрыковки / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, А.В. Периг // Издательства научных трудов Донбасской государственной машиностроительной академии. — 2013. — Вып. 2. — С. 27–45.

53. Тюрин, В.А. Ковка полых заготовок на РОМ / В.А. Тюрин, Г.П. Жигулев, А.М. Володин // Кузнечно-штамповочное производство. — 1993. — № 1. — С. 10–12.
54. Hojas, H. GFM Precision Radial Forging Machines // Proceedings of the FIA Equipment Symposium — Chicago, 1973. — P. 32.
55. Hojas, H Use of forging machines for the production of high quality bar Steel // Machinery and Production Engineering — 1977. — Vol. 30 No. 7 — P. 62–64.
57. Лазоркин, В.А., Тюрин, В.А., Поспелов, И.А. Разработка и внедрение рациональных режимов деформирования слитков из инструментальных сталей на радиально-ковочной машине // Кузнечно-штамповочное производство. — 1986. — № 5. — С. 8–10.
56. Лазоркин, В.А., Тюрин, В.А., Залужный, Ю.Г. Исследование радиального обжатия слитков и заготовок из быстрорежущих сталей // Кузнечно-штамповочное производство. — 1987. — № 6. — С. 7–9.
58. Балахнин, А.Н. Влияние холодной пластической деформации методом радиальнойковки и последующей термической обработки на структуру и свойства стали 10ХЗГЗМФ / А.Н. Балахнин, Д.О. Панов, М.Г. Титова [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2012. — № 11. — С. 22.
59. Асфандияров, Р.Н. Исследование потенциала ротационного обжатия как метода интенсивной пластической деформации / Р.Н. Асфандияров, Г.И. Рааб, В.И. Семенов // Нефтегазовые технологии и новые материалы проблемы и решения. — 2015. — Выпуск 4 (9). — С. 381–387.
60. Степин, П.С. Исследование потенциала ротационнойковки для получения материалов с ультрамелкозернистой структурой / П.С. Степин., Г.И. Рааб // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. — 2012. — № 4. — С. 34–37.
61. Гриднев, В.Н. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В.Н. Гриднев, В.Г. Гаврилюк, Ю.А. Мешков. — К.: Наукова думка, 1974. — 231 с.

62. Лузин, Ю.Ф. Режимы радиальнойковки в зависимости от свойств деформируемого металла / Ю.Ф. Лузин, Н.Н. Киселев // Качественные стали и сплавы: Тематич. отраслевой сб. — М., 1978. — № 3. — С. 93–97.
63. Штрымов, А.И. Изготовление поковок ступенчатых валов и осей на радиально-ковочных машинах / А.И. Штрымов, Л.М. Суслов, Т.В. Липилина // Кузнечно-штамповочное производство. — 1972. — № 6. — С. 46–47.
64. Ширинкин, Л.В. Технологические возможности и область применения радиально-обжимных машин / Л.В. Ширинкин // Кузнечно-штамповочное производство. — 1987. — № 6. — С. 6–7.
65. Гредитор, М.А. Давильные работы и ротационное выдавливание / М.А. Гредитор. — М.: Машиностроение, 1971. — 232 с.
66. Тюрин, В.А. Инновационные технологииковки / В.А. Тюрин // Кузнечно-штамповое производство. — 2006. — № 5. — С. 27–29.
67. Радюченко, Ю.С. Комплексное решение вопросов развития технологии и оборудования для радиального обжата / Ю.С. Радюченко // Кузнечно-штамповочное производство, 1987. — № 6. — С. 2–5.
68. Суслов, Л.М. О ковке на радиально-ковочных машинах / Л.М. Суслов // Кузнечно-штамповочное производство. — 1975. — № 4. — С. 17–19.
69. Дзугутов, М.Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов / М.Я. Дзугутов. — М.: Металлургия, 1977. — 424 с.
70. Ростовщиков, В.А. Технология и оборудование для формообразования полых длинномерных поковок горячим радиальным обжатием / В.А. Ростовщиков // Кузнечно-штамповочное производство. — 1987. — № 6. — С. 10–13.
71. Егоров, Г.В., Радюченко, Ю.С, Чудаков, П.Д. Об определении оптимальной величины подачи при радиальном обжатии заготовок сплошного сечения // Кузнечно-штамповочное производство. — 1978. — № 7. — С. 5–8.
72. Лялин, В.М. Исследование силовых характеристик высокоскоростного холодного радиального обжата трубной заготовки из конструкционной легированной стали / В.М. Лялин, Р.А. Сидоров, С.М. Зыков // Известия

Тульского государственного университета. Технические науки. — 2020. — Вып. 11. — С. 436–441.

73. Кроха, В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации / В.А. Кроха. — М.: Машиностроение, 1968. — 131 с., ил.

74. Ростовщиков, В.А. Технология и оборудование для формообразования полых длинномерных поковок горячим радиальным обжатием / В.А. Ростовщиков // Кузнечно-штамповочное производство. — 1987. — № 6. — С. 10–13.

75. Утяшев, Ф.З. Современные методы интенсивной пластической деформации: Учеб. пособие / Ф.З. Утяшев. — Уфа: УГАТУ, 2008. — 313 с.

76. Schrader H. Rotation deforming of bars and pipes // Metall. — 1983. — № 37. — P. 4–5.

77. Тюрин, В.А. Степень и скорость деформации при ковке полосы на радиально-ковочных машинах / В.А. Тюрин, А.Н. Осадчий, В.А. Лазоркин // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1981. — № 4. — С. 74–78.

78. Дмитриева, А.Я. Прогнозирование механических свойств изделия после холодной радиальнойковки по результатам конечно-элементного моделирования / А.Я. Дмитриева // Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение. — 2011. — №7. — С. 35–38.

79. Власов, А.В. Моделирование технологического процесса радиальнойковки в программном комплексе DEFORM 3D. Труды Международной научно-практической конференции / А.В. Власов, А.Я. Погорильчук (Дмитриева) // Инженерные системы 2009 — М., 2009. — С. 108–112.

80. Асфандияров, Р.Н. Исследование метода ротационного обжатия в условиях больших деформаций / Р.Н. Асфандияров, Г.И. Рааб // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета — 2016. — Вып. № 3 (73). — С. 3–6.

81. Лялин, В.М. Исследование силовых характеристик высокоскоростного холодного радиального обжатия трубной заготовки из конструкционной

легированной стали / В.М. Лялин, Р.А. Сидоров, С.М. Зыков // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2020. — Вып. 11. — С. 436–441. (упрочнение)

82. Савинов, Б.А. Технологические и конструктивные особенности радиально-обжимных (ковочных) машин и перспективы их развития / Б.А. Савинов // Кузнечно-штамповочное производство. — 1981. — С. 20–23.

83. Богатов, А.А., Мижирицкий, О.И., Смирнов, С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке металлов давлением. — М.: Металлургия, 1984. — 144 с.

84. Елкин, Н.М. Технология холодной раскатки точных заготовок / Н.М. Елкин // Кузнечно-штамповочное производство. — 1995. — № 1. — С. 20–22.

85. Белова, Л.П. Исследование очага деформации при обжатии круглой заготовки комбинированными бойками / Л.П. Белова, В.А. Тюрин, А.Н. Дубков // Кузнечно-штамповочное производство. — 1981. № 4. — С. 14–17.

86. Карякин, М.И. Устойчивость нелинейно-упругого цилиндра с клиновой дисклинацией при радиальном обжатии / М.И. Карякин, Л.П. Обрезков // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2018. — № 4. — С. 25–31.

87. Тетерин, П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки / П.К. Тетерин. — М.: Металлургия, 1971. — 368 с., ил.

88. Технология обработки цветных металлов и сплавов: Учебное пособие / А.Б. Найзабеков, С.Н. Лежнев, С.С. Айнабекова и др. — Рудный: РИИ, 2019. — 101 с.

89. Костыгова, Т.В. Эффективность использования и эксплуатации волок при волочении медной проволоки / Т.В. Костыгова, А.А. Путилова // Вестник ПНИПУ, 2017. — № 22. — С. 127–138.

90. ESTEVES GROUP. Справочник о волокнах the Ewizard. – Испания, Diamonds Tools Group BV, 2008. – 122 с.

91. Куренкова, Т.П. Определение возможных причин образования дефекта «точечное выкрашивание» в твердосплавном волочильном инструменте в

процессе волочения» / Т.П. Куренкова, И.П. Лазебникова, Т.Н. Липаткина // *Литьё и металлургия*. — 2011. — № 2. — С. 148–151.

92. Богодухов, С.И. Упрочнение твердых сплавов (обзор) / С.И. Богодухов, Е.С. Козик, Е.В. Свиденко // *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2015. — № 11 (131). — С. 3–11.

93. Fabík, R. Impact of drawing process parameters on uniformity of strain in spring wire / R. Fabík, P. Halfarova // *Metal*. 2011. — №. 18–20.

94. Богодухов, С.И. Влияние химико-термической обработки на износостойкость спеченных твердых сплавов / С.И. Богодухов, Е.С. Козик, Е.В. Свиденко // *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2016. — № 3 (135). — С. 21–25.

95. Гурьев, А.М. Химико-термическая обработка материалов для режущего инструмента / А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, М.А. Гурьев // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2015. — № 8 (58). — С. 578–582.

96. Марусич, К.В. Анализ режимов термической обработки твердосплавных волок / К.В. Марусич, М.М. Шабаев // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2018. — № 7. — С. 96–102.

97. The influence of die approach and bearing part of die on mechanical technological properties of high carbon steel wires / J. Adamczyk, M. Suliga, J.W. Pilarczyk, M. Burdek // *Archives of metallurgy and materials*, 2012. — Vol. 57, issue 4. — pp. 1106–1110.

98. Орлов, Г.А. Основы теории прокатки и волочения труб: учебное пособие / Г.А. Орлов. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 204 с., ил.

99. Исследование численным моделированием влияния формы деформирующей зоны волокна при волочении стальной высокоуглеродистой проволоки на температурное и напряженно-деформированное состояние в проволоке и волокне / Ю.Л. Бобаркин и др. // *Литье и металлургия*, 2012. — № 3 (67). — С. 196–200.

100. Перлин, И.Л. Теория волочения / И.Л. Перлин, И.З. Ерманок. — М.: Металлургия, 1971. — 243 с., ил.

101. Дорохов, Д.О. Управляемое градиентное упрочнение осесимметричных изделий комплексным локальным нагружением очага деформации: специальность 05.02.09 "Технологии и машины обработки давлением": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Дорохов Даниил Олегович, 2018. — 285 с.
102. Погорелов, А.В. Геометрия: [учебное пособие для вузов по специальности "Математика"] / А.В. Погорелов. — Москва: Наука, 1983. — 287 с.
103. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. — 13-е изд., испр. — Москва: Наука, 1986. — 544 с.
104. Низмеев, А.А. Предварительная обработка цилиндрических деталей перед сваркой с помощью радиального обжатия в единичном производстве / А.А. Низмеев, Д.О. Дорохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2025. — №4 (372). — С. 55–61.
105. Низмеев, А.А. К вопросу выбора геометрии инструмента для деформирования осесимметричных изделий / А.А. Низмеев, Д.О. Дорохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2025. — №6 (374). — С. 22–26.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А – Результаты эксперимента

Таблица А.1 – Усилие обжатия образцов бойками с параболическим профилем

<i>Номер цикла, i</i>	<i>Усилие Р_к, кН</i>	<i>Время цикла t, с</i>	<i>Номер цикла, i</i>	<i>Усилие Р_к, кН</i>	<i>Время цикла t, с</i>	<i>Номер цикла, i</i>	<i>Усилие Р_к, кН</i>	<i>Время цикла t, с</i>
1	171	1,8	1	179	1,74	1	183	1,84
2	422	1,73	2	424	1,79	2	435	1,75
3	543	1,82	3	533	1,75	3	541	1,81
4	537	1,77	4	543	1,79	4	558	1,83
5	543	1,79	5	536	1,81	5	536	1,84
6	540	1,8	6	540	1,86	6	553	1,72
7	536	1,73	7	546	1,84	7	556	1,76
8	549	1,84	8	530	1,82	8	547	1,77
9	333	1,8	9	350	1,79	9	344	1,78
10	98	1,84	10	95	1,75	10	102	1,75
<i>Номер цикла, i</i>	<i>Усилие Р_к, кН</i>	<i>Время цикла t, с</i>	<i>Номер цикла, i</i>	<i>Усилие Р_к, кН</i>	<i>Время цикла t, с</i>	<i>Номер цикла, i</i>	<i>Усилие Р_к, кН</i>	<i>Время цикла t, с</i>
1	183	1,82	1	171	1,73	1	179	1,77
2	432	1,79	2	425	1,79	2	437	1,84
3	546	1,75	3	558	1,82	3	556	1,81
4	546	1,82	4	551	1,78	4	545	1,76
5	556	1,8	5	532	1,8	5	545	1,83
6	532	1,84	6	546	1,83	6	539	1,78
7	545	1,81	7	541	1,84	7	545	1,78
8	533	1,79	8	556	1,72	8	551	1,72
9	346	1,73	9	333	1,77	9	341	1,75
10	87	1,78	10	95	1,75	10	89	1,85
<i>Номер цикла, i</i>	<i>Усилие Р_к, кН</i>	<i>Время цикла t, с</i>	<i>Номер цикла, i</i>	<i>Усилие Р_к, кН</i>	<i>Время цикла t, с</i>	<i>Номер цикла, i</i>	<i>Усилие Р_к, кН</i>	<i>Время цикла t, с</i>
1	185	1,72	1	182	1,85	1	173	1,76
2	416	1,81	2	422	1,82	2	436	1,84
3	547	1,8	3	532	1,86	3	541	1,75
4	539	1,83	4	536	1,8	4	544	1,83
5	541	1,75	5	556	1,83	5	550	1,85
6	536	1,72	6	530	1,75	6	555	1,72
7	545	1,83	7	535	1,72	7	535	1,74
8	547	1,73	8	544	1,73	8	542	1,72
9	342	1,74	9	339	1,74	9	336	1,79
10	89	1,76	10	94	1,85	10	96	1,8

Продолжение таблицы А.1

Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	194	1,82	1	176	1,75	1	188	1,85
2	420	1,84	2	433	1,77	2	417	1,86
3	558	1,85	3	555	1,72	3	539	1,84
4	536	1,77	4	548	1,74	4	558	1,8
5	536	1,75	5	541	1,75	5	557	1,72
6	543	1,72	6	553	1,75	6	549	1,79
7	557	1,86	7	543	1,77	7	544	1,78
8	533	1,73	8	540	1,8	8	544	1,73
9	334	1,76	9	329	1,78	9	327	1,86
10	103	1,73	10	107	1,81	10	94	1,74
Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	175	1,81	1	183	1,77	1	172	1,79
2	423	1,77	2	440	1,84	2	430	1,77
3	551	1,81	3	537	1,79	3	550	1,79
4	550	1,82	4	554	1,86	4	544	1,72
5	544	1,86	5	548	1,72	5	542	1,73
6	534	1,75	6	547	1,82	6	553	1,82
7	530	1,8	7	544	1,8	7	538	1,81
8	544	1,83	8	542	1,84	8	553	1,83
9	341	1,73	9	337	1,72	9	347	1,79
10	92	1,83	10	88	1,77	10	90	1,84
Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с				мин	макс	мат. ожидание
1	180	1,78				171	194	179,6
2	423	1,82				416	440	427,2
3	554	1,75				532	558	546,3
4	531	1,73				531	558	545,0
5	543	1,72				532	557	544,1
6	531	1,8				530	555	542,6
7	555	1,86				530	557	543,4
8	532	1,78				530	556	542,9
9	344	1,75				327	350	338,9
10	94	1,73				87	107	94,6

Таблица А.2 – Диаметры заготовок после обжатия

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	мин	макс
Диаметр	33,9	33,7	34,1	33,9	34	34,2	33,8	34		
Номер образца	9	10	11	12	13	14	15	16	33,7	34,2
Диаметр	34,2	34,1	34	34,2	33,8	34	33,7	34,2		

Таблица А.3 – Усилие обжатия образцов бойками с гиперболическим профилем

Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	109	1,84	1	102	1,77	1	110	1,84
2	220	1,77	2	228	1,83	2	226	1,72
3	340	1,73	3	339	1,76	3	338	1,86
4	438	1,76	4	424	1,71	4	429	1,84
5	425	1,76	5	424	1,72	5	426	1,72
6	427	1,79	6	429	1,79	6	439	1,81
7	427	1,8	7	434	1,83	7	438	1,73
8	341	1,73	8	335	1,75	8	346	1,86
9	223	1,75	9	226	1,72	9	235	1,84
10	108	1,84	10	110	1,85	10	115	1,75
Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	114	1,71	1	102	1,83	1	99	1,81
2	218	1,76	2	219	1,8	2	234	1,79
3	329	1,74	3	343	1,76	3	335	1,76
4	430	1,85	4	428	1,71	4	434	1,81
5	430	1,72	5	429	1,83	5	428	1,84
6	429	1,77	6	425	1,75	6	434	1,77
7	428	1,83	7	429	1,78	7	423	1,84
8	336	1,79	8	340	1,72	8	335	1,86
9	234	1,77	9	225	1,79	9	219	1,71
10	113	1,78	10	103	1,73	10	108	1,81
Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	113	1,72	1	103	1,79	1	113	1,84
2	230	1,75	2	218	1,77	2	222	1,72
3	339	1,86	3	328	1,84	3	334	1,83
4	434	1,82	4	440	1,83	4	440	1,8
5	438	1,71	5	436	1,76	5	439	1,77
6	424	1,79	6	431	1,75	6	438	1,73
7	425	1,81	7	429	1,75	7	423	1,84
8	335	1,77	8	340	1,71	8	337	1,76
9	233	1,8	9	220	1,73	9	227	1,75
10	113	1,74	10	110	1,82	10	115	1,79

Продолжение таблицы А.3

Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	101	1,78	1	114	1,75	1	115	1,77
2	223	1,82	2	236	1,84	2	228	1,79
3	337	1,77	3	331	1,83	3	328	1,8
4	424	1,82	4	423	1,71	4	428	1,75
5	437	1,85	5	439	1,8	5	426	1,82
6	440	1,78	6	435	1,81	6	428	1,79
7	433	1,72	7	426	1,76	7	441	1,86
8	345	1,73	8	338	1,79	8	350	1,73
9	233	1,72	9	223	1,81	9	237	1,82
10	107	1,83	10	112	1,84	10	111	1,83
Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	110	1,83	1	110	1,85	1	104	1,8
2	219	1,71	2	220	1,78	2	229	1,79
3	340	1,76	3	339	1,82	3	344	1,82
4	437	1,77	4	438	1,79	4	423	1,84
5	436	1,72	5	440	1,8	5	440	1,75
6	432	1,86	6	438	1,72	6	426	1,74
7	426	1,75	7	425	1,75	7	440	1,86
8	340	1,83	8	349	1,78	8	337	1,83
9	233	1,79	9	234	1,84	9	219	1,77
10	116	1,83	10	109	1,72	10	107	1,84
Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с				мин	макс	мат. ожидания
1	114	1,73				99	115	108,3
2	235	1,86				218	236	225,3
3	345	1,79				328	345	336,8
4	423	1,72				423	440	430,8
5	436	1,77				424	440	433,1
6	434	1,78				424	440	431,8
7	436	1,82				423	441	430,2
8	352	1,8				335	352	341,0
9	237	1,84				219	237	228,6
10	116	1,75				103	116	110,8

Таблица А.4 – Диаметры заготовок после обжатия

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	мин	макс
Диаметр	34,1	34,1	34,1	34,3	34	34,2	33,8	34,2		
Номер образца	9	10	11	12	13	14	15	16	33,8	34,3
Диаметр	33,8	33,8	34	33,9	34,2	34,3	33,9	34,1		

Таблица А.5 – Усилие обжатия образцов бойками с логарифмическим профилем

Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	169	1,85	1	157	1,74	1	166	1,83
2	339	1,74	2	325	1,73	2	326	1,74
3	517	1,81	3	522	1,79	3	513	1,73
4	521	1,74	4	523	1,81	4	534	1,83
5	534	1,82	5	525	1,77	5	523	1,81
6	531	1,83	6	526	1,81	6	535	1,73
7	516	1,85	7	528	1,85	7	522	1,81
8	527	1,72	8	522	1,8	8	515	1,84
9	330	1,83	9	331	1,77	9	319	1,8
10	85	1,82	10	90	1,8	10	92	1,76
Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	170	1,71	1	165	1,77	1	162	1,76
2	328	1,74	2	329	1,72	2	336	1,85
3	525	1,82	3	519	1,75	3	532	1,73
4	527	1,75	4	525	1,75	4	532	1,82
5	533	1,78	5	518	1,85	5	514	1,76
6	521	1,71	6	529	1,81	6	531	1,75
7	532	1,76	7	523	1,75	7	520	1,83
8	528	1,73	8	528	1,82	8	535	1,82
9	318	1,81	9	326	1,75	9	312	1,76
10	97	1,83	10	81	1,79	10	96	1,79
Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, i	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	149	1,72	1	153	1,83	1	168	1,82
2	333	1,73	2	338	1,77	2	328	1,85
3	529	1,81	3	535	1,83	3	528	1,71
4	515	1,83	4	533	1,73	4	523	1,81
5	531	1,84	5	534	1,76	5	514	1,83
6	533	1,81	6	527	1,75	6	533	1,78
7	529	1,8	7	523	1,75	7	515	1,82
8	527	1,73	8	523	1,76	8	520	1,85
9	329	1,76	9	325	1,81	9	328	1,8
10	80	1,74	10	90	1,82	10	89	1,84

Продолжение таблицы А.5

Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	153	1,82	1	165	1,75	1	164	1,85
2	338	1,85	2	340	1,77	2	333	1,86
3	524	1,75	3	522	1,72	3	530	1,84
4	530	1,77	4	523	1,74	4	519	1,8
5	528	1,81	5	535	1,75	5	532	1,72
6	521	1,73	6	525	1,75	6	529	1,79
7	531	1,82	7	526	1,77	7	533	1,78
8	526	1,74	8	521	1,8	8	535	1,73
9	315	1,82	9	316	1,78	9	328	1,86
10	91	1,83	10	83	1,81	10	89	1,74
Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с	Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с
1	168	1,78	1	149	1,78	1	158	1,83
2	341	1,76	2	326	1,74	2	328	1,75
3	534	1,76	3	535	1,72	3	527	1,72
4	521	1,8	4	527	1,73	4	532	1,82
5	526	1,8	5	517	1,81	5	528	1,81
6	528	1,84	6	515	1,8	6	519	1,71
7	520	1,81	7	519	1,82	7	529	1,76
8	532	1,85	8	534	1,75	8	534	1,81
9	324	1,76	9	312	1,8	9	329	1,72
10	85	1,85	10	91	1,76	10	91	1,8
Номер цикла, <i>i</i>	Усилие P_k , кН	Время цикла t , с				мин	макс	мат. ожидание
1	158	1,84				149	170	160,9
2	344	1,73				325	344	333,3
3	535	1,84				513	535	526,7
4	528	1,83				515	534	525,8
5	515	1,72				514	535	525,4
6	523	1,84				515	535	526,6
7	533	1,8				515	533	524,9
8	516	1,74				515	535	526,4
9	331	1,83				312	331	323,3
10	82	1,84				80	97	88,3

Таблица А.6 – Диаметры заготовок после обжатия

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	мин	макс
Диаметр	33,9	33,7	34,2	33,9	34	34,2	34	34		
Номер образца	9	10	11	12	13	14	15	16	33,7	34,3
Диаметр	34,2	34,1	34	34,3	33,8	33,7	34	34,1		

Стadium процесса	Номер шага, i	Начальный диаметр d _p , мм	Конечный диаметр i-ого шага d _p , мм	Угол захватного конуса α, в конечной точке i-ого шага, град. dec.	d _z ²	d _z *α	α _{расч} ¹	(α _{г-расч}) ²	Угол захватного конуса i-ого шага α _ш , град.	Угол захватного конуса i-ого шага α _ш , рад	Относительная степень деформации ε _i на i-ом шаге	Предел текучести обрабатываемого материала в конечной точке i-ого шага σ _{т расч} , МПа	Предел текучести обрабатываемого материала на i-ом шаге σ _{т ш} , МПа	Предел текучести обрабатываемого материала на i-ом шаге σ _{т ш} , кгс/к ²	Диаметр нейтральной поверхности на i-ом шаге d ₀ , мм	Усилие обжатия F _ж , кгс	Усилие обжатия P _ж , кН	Среднее удельное усилие P _ж , кН	Площадь проекции очага деформации F _п , мм ²	Полная работа формоизменения A _п , кН · мм	Мощность обжатия на i-ом шаге N _i , кВт
Начальная	0	37	37,0	7,5	1369,00	277,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,000	355,00	355,00	36,22	37,00	0	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00
	1	37	36,9	7,5	1361,61	276,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,005	413,96	384,48	39,23	36,91	1104	10,82	0,3855	28,19	3294,35	0,04
	2	37	36,8	7,5	1354,24	276,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,011	466,76	411,91	42,03	36,83	2369	23,22	0,4142	56,30	7075,58	0,09
	3	37	36,7	7,5	1346,89	275,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,016	501,72	434,36	44,32	36,74	3752	36,77	0,4379	84,33	11230,52	0,14
	4	37	36,6	7,5	1339,56	274,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,022	528,54	453,20	46,24	36,66	5227	51,23	0,4582	112,29	15681,54	0,20
	5	37	36,5	7,5	1332,25	273,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,027	550,56	469,42	47,90	36,58	6777	66,42	0,4759	140,17	20381,82	0,26
	6	37	36,4	7,5	1324,96	273,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,032	569,37	483,70	49,36	36,49	8391	82,23	0,4917	167,98	25300,61	0,32
	7	37	36,3	7,5	1317,69	272,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,037	585,88	496,47	50,66	36,41	10062	98,61	0,5060	195,71	30416,37	0,39
	8	37	36,2	7,5	1310,44	271,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,043	600,64	508,05	51,84	36,33	11783	115,47	0,5192	223,36	35713,25	0,45
	9	37	36,1	7,5	1303,21	270,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,048	614,01	518,64	52,92	36,25	13550	132,79	0,5315	250,94	41179,12	0,52
	10	37	36,0	7,5	1296,00	270,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,053	626,27	528,43	53,92	36,17	15360	150,53	0,5430	278,44	46804,48	0,59
	11	37	35,9	7,5	1288,81	269,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,059	637,59	537,52	54,85	36,09	17210	168,66	0,5538	305,87	52581,71	0,67
	12	37	35,8	7,5	1281,64	268,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,064	648,13	546,03	55,72	36,01	19097	187,15	0,5641	333,21	58504,58	0,74
	13	37	35,7	7,5	1274,49	267,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,069	657,99	554,03	56,53	35,93	21019	205,99	0,5739	360,49	64567,95	0,82
	14	37	35,6	7,5	1267,36	267,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,074	667,27	561,58	57,30	35,85	22974	225,15	0,5833	387,68	70767,54	0,90
	15	37	35,5	7,5	1260,25	266,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,079	676,04	568,73	58,03	35,77	24962	244,63	0,5923	414,80	77099,74	0,98
	16	37	35,4	7,5	1253,16	265,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,085	684,36	575,53	58,73	35,70	26980	264,40	0,			

30	37	34,0	7,5	1156,00	255,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,156	771,06	647,30	66,05	34,67	57964	568,05	0,7022	812,44	186696,55	2,36	
31	37	33,9	7,5	1149,21	254,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,161	775,86	651,32	66,46	34,60	60350	591,43	0,7085	838,34	194936,73	2,47	
32	37	33,8	7,5	1142,44	253,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,165	780,54	655,23	66,86	34,53	62758	615,02	0,7148	864,16	203292,29	2,57	
33	37	33,7	7,5	1135,69	252,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,170	785,10	659,05	67,25	34,46	65186	638,82	0,7210	889,91	211763,43	2,68	
34	37	33,6	7,5	1128,96	252,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,175	789,54	662,78	67,63	34,40	67635	662,83	0,7271	915,58	220350,47	2,79	
35	37	33,5	7,5	1122,25	251,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,180	793,88	666,42	68,00	34,33	70105	687,03	0,7331	941,17	229053,78	2,90	
36	37	33,4	7,5	1115,56	250,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,185	798,11	669,98	68,37	34,26	72595	711,44	0,7391	966,69	237873,81	3,01	
37	37	33,3	7,5	1108,89	249,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,190	802,25	673,46	68,72	34,20	75106	736,04	0,7451	992,13	246811,06	3,12	
38	37	33,2	7,5	1102,24	249,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,195	806,30	676,87	69,07	34,13	77637	760,84	0,7510	1017,49	255866,13	3,24	
39	37	33,1	7,5	1095,61	248,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,200	810,25	680,20	69,41	34,06	80188	785,84	0,7569	1042,78	265039,64	3,36	
40	37	33,0	7,5	1089,00	247,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,205	814,12	683,47	69,74	34,00	82759	811,04	0,7627	1067,99	274332,32	3,47	
41	37	32,9	7,5	1082,41	246,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,209	817,52	686,66	70,07	33,93	85349	836,42	0,7685	1093,13	283741,08	3,59	
42	37	32,8	7,5	1075,84	246,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,214	819,64	689,75	70,38	33,87	87954	861,95	0,7742	1118,19	293254,78	3,71	
43	37	32,7	7,5	1069,29	245,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,219	821,75	692,75	70,69	33,81	90574	887,63	0,7798	1143,17	302874,75	3,83	
44	37	32,6	7,5	1062,76	244,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,224	823,85	695,67	70,99	33,74	93210	913,46	0,7854	1168,08	312602,35	3,96	
45	37	32,5	7,5	1056,25	243,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,228	825,95	698,50	71,28	33,68	95861	939,44	0,7909	1192,91	322438,99	4,08	
46	37	32,4	7,5	1049,76	243,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,233	828,04	701,25	71,56	33,62	98529	965,58	0,7964	1217,67	332386,11	4,21	
47	37	32,3	7,5	1043,29	242,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,238	830,12	703,94	71,83	33,55	101212	991,88	0,8018	1242,34	342445,19	4,34	
48	37	32,2	7,5	1036,84	241,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,243	832,20	706,56	72,10	33,49	103911	1018,33	0,8072	1266,95	352617,77	4,46	
49	37	32,1	7,5	1030,41	240,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,247	834,27	709,11	72,36	33,43	106627	1044,95	0,8126	1291,47	362905,42	4,59	
50	37	32,0	7,5	1024,00	240,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,252	836,34	711,61	72,61	33,37	109360	1071,72	0,8179	1315,92	373309,73	4,73	
51	37	31,9	7,5	1017,61	239,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,257	838,39	714,04	72,86	33,31	112109	1098,67	0,8233	1340,29	383832,36	4,86	
52	37	31,8	7,5	1011,24	238,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,261	840,45	716,43	73,11	33,25	114875	1125,77	0,8285	1364,59	394475,01	4,99	
53	37	31,7	7,5	1004,89	237,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,266	842,49	718,76	73,34	33,19	117658	1153,05	0,8338	1388,81	405239,42	5,13	
54	37	31,6	7,5	998,56	237,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,271	844,53	721,05	73,58	33,13	120459	1180,50	0,8391	1412,96	416127,38	5,27	
55	37	31,5	7,5	992,25	236,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,275	846,56	723,29	73,81	33,07	123277	1208,12	0,8443	1437,02	427140,72	5,41	
56	37	31,4	7,5	985,96	235,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,280	848,59	725,49	74,03	33,01	126113	1235,91	0,8496	1461,02	438281,31	5,55	
57	37	31,3	7,5	979,69	234,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,284	850,61	727,65	74,25	32,95	128968	1263,88	0,8548	1484,93	449551,09	5,69	
58	37	31,2	7,5	973,44	234,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,289	852,62	729,77	74,47	32,90	131840	1292,04	0,8600	1508,77	460952,03	5,84	
59	37	31,1	7,5	967,21	233,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,293	854,63	731,85	74,68	32,84	134732	1320,37	0,8653	1532,53	472486,17	5,98	
60	37	31,0	7,5	961,00	232,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,298	856,63	733,89	74,89	32,78	137642	1348,89	0,8705	1556,22	484155,58	6,13	
Основная																					
Сумма Σ	1830	2257	2074	457,5	70705,10	15555	458	0	457,5	7,98488	9,3527392	44767,406									6,13
Искомые коэффициенты												k ₀ = 7,5000									
												k ₁ = 0,0000									

Номер шага, l	Начальный диаметр d_p , мм	Конечный диаметр d_p , мм	Угол заходного конуса $\alpha_{\text{зах}}$ в конечной точке l-ого шага, град. дес.	$d_{\text{л}2}$	$d_{\text{л}1} \cdot \alpha$	$\alpha_{\text{расч}1}$	$(\alpha_{\text{расч}1})^2$	Угол заходного конуса l-ого шага $\alpha_{\text{зах}}$ град.	Угол заходного конуса l-ого шага $\alpha_{\text{зах}}$ рад	Относительная степень деформации ε , на l-ом шаге	Предел текучести обрабатываемого материала в конечной точке l-ого шага $\sigma_{\text{тп}}$, МПа	Предел текучести обрабатываемого материала на l-ом шаге $\sigma_{\text{тп}}$, МПа	Предел текучести обрабатываемого материала на l-ом шаге $\sigma_{\text{тп}}$, кгс	Диаметр нейтральной поверхности на l-ом шаге d_{0p} , мм	Усилие обжатия $P_{\text{ж}}$, кгс	Усилие обжатия $P_{\text{ж}}$, кН	Среднее удельное усилие $P_{\text{жс}}$, кН	Площадь проекции очага деформации $F_{\text{пр}}$, мм ²	Полная работа формоизменения $A_{\text{п}}$, кН · мм	Мощность обжатия на l-ом шаге N_p , кВт
1	36,9	31,0	7,5	1361,61	276,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,294	854,63	740,21	75,53	32,74	135941	1332,22	0,8756	1528,03	476958,16	6,04
2	36,8	31,0	7,5	1354,24	276,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,290	852,62	745,74	75,53	32,70	133077	1304,15	0,8732	1499,92	465720,72	5,90
3	36,7	31,0	7,5	1346,89	275,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,287	850,61	750,55	76,10	32,66	131208	1285,83	0,8774	1471,89	458004,36	5,80
4	36,6	31,0	7,5	1339,56	274,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,283	848,59	754,91	76,59	32,62	129193	1266,10	0,8806	1443,93	449816,44	5,69
5	36,5	31,0	7,5	1332,25	273,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,279	846,56	758,95	77,03	32,58	127089	1245,48	0,8833	1416,05	441351,27	5,59
6	36,4	31,0	7,5	1324,96	273,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,275	844,53	762,74	77,44	32,54	124921	1224,22	0,8857	1388,24	432698,97	5,48
7	36,3	31,0	7,5	1317,69	272,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,271	842,49	766,32	77,83	32,50	122703	1202,49	0,8877	1360,51	423913,28	5,37
8	36,2	31,0	7,5	1310,44	271,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,267	840,45	769,73	78,20	32,46	120445	1180,36	0,8894	1332,86	415030,47	5,25
9	36,1	31,0	7,5	1303,21	270,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,263	838,39	772,98	78,54	32,42	118156	1157,92	0,8909	1305,28	406076,92	5,14
10	36	31,0	7,5	1296,00	270,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,258	836,34	776,10	78,88	32,39	115839	1135,23	0,8923	1277,78	397072,81	5,03
11	35,9	31,0	7,5	1288,81	269,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,254	834,27	779,09	79,19	32,35	113501	1112,31	0,8934	1250,35	388034,12	4,91
12	35,8	31,0	7,5	1281,64	268,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,250	832,20	781,98	79,50	32,31	111145	1089,22	0,8945	1223,01	378973,90	4,80
13	35,7	31,0	7,5	1274,49	267,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,246	830,12	784,77	79,79	32,27	108773	1065,98	0,8953	1195,73	369902,97	4,68
14	35,6	31,0	7,5	1267,36	267,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,242	828,04	787,47	80,08	32,24	106388	1042,61	0,8961	1168,54	360830,51	4,57
15	35,5	31,0	7,5	1260,25	266,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,237	825,95	790,08	80,35	32,20	103993	1019,13	0,8967	1141,42	351764,38	4,45
16	35,4	31,0	7,5	1253,16	265,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,233	823,85	792,61	80,62	32,16	101589	995,57	0,8972	1114,38	342711,41	4,34
17	35,3	31,0	7,5	1246,09	264,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,229	821,75	795,08	80,88	32,13	99178	971,95	0,8977	1087,41	333677,55	4,22
18	35,2	31,0	7,5	1239,04	264,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,224	819,64	797,47	81,13	32,09	96762	948,27	0,8980	1060,52	324668,09	4,11
19	35,1	31,0	7,5	1232,01	263,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,220	817,52	799,79	81,37	32,06	94341	924,54	0,8983	1033,70	315687,71	4,00
20	35	31,0	7,5	1225,00	262,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,216	815,42	802,05	81,61	32,02	91917	900,79	0,8984	1006,97	306740,59	3,88
21	34,9	31,0	7,5	1218,01	261,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,211	813,32	804,26	81,84	31,99	89492	877,02	0,8985	980,30	297830,50	3,77
22	34,8	31,0	7,5	1211,04	261,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,206	811,22	806,40	82,07	31,95	87066	853,24	0,8985	953,72	288960,84	3,66
23	34,7	31,0	7,5	1204,09	260,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,202	809,11	808,49	82,29	31,92	84639	829,46	0,8984	927,21	280134,69	3,55
24	34,6	31,0	7,5	1197,16	259,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,197	807,01	810,53	82,50	31,88	82214	805,69	0,8983	900,78	271354,86	3,44
25	34,5	31,0	7,5	1190,25	258,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,193	799,88	812,51	82,71	31,85	79789	781,94	0,8981	874,42	262623,91	3,32
26	34,4	31,0	7,5	1183,36	258,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,188	797,79	814,45	82,91	31,82	77368	758,20	0,8978	848,14	253944,19	3,22
27	34,3	31,0	7,5	1176,49	257,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,183	795,70	816,33	83,11	31,79	74949	734,50	0,8975	821,94	245317,86	3,11
28	34,2	31,0	7,5	1169,64	256,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,178	793,62	818,16	83,30	31,75	72534	710,83	0,8971	795,81	236746,90	3,00
29	34,1	31,0	7,5	1162,81	255,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,174	791,54	819,95	83,49	31,72	70123	687,20	0,8966	769,76	228233,15	2,89
30	34	31,0	7,5	1156,00	255,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,169	789,47	821,68	83,67	31,69	67716	663,62	0,8961	743,78	219778,30	2,78
31	33,9	31,0	7,5	1149,21	254,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,164	787,40	823,37	83,85	31,66	65315	640,09	0,8955	717,88	211383,93	2,68
32	33,8	31,0	7,5	1142,44	253,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,159	785,32	825,01	84,02	31,63	62920	616,61	0,8948	692,06	203051,51	2,57
33	33,7	31,0	7,5	1135,69	252,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,154	783,25	826,60	84,18	31,60	60530	593,19	0,8941	666,31	194782,40	2,47

Конечная

34	33,6	31,0	7,5	1128,96	252,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,149	750,41	828,13	84,35	31,57	58147	569,84	0,8933	640,64	186577,87	2,36
35	33,5	31,0	7,5	1122,25	251,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,144	744,85	829,62	84,50	31,54	55771	546,56	0,8925	615,05	178439,12	2,26
36	33,4	31,0	7,5	1115,56	250,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,139	739,10	831,05	84,65	31,52	53403	523,34	0,8916	589,53	170367,27	2,16
37	33,3	31,0	7,5	1108,89	249,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,133	733,15	832,42	84,80	31,49	51042	500,21	0,8906	564,09	162363,38	2,06
38	33,2	31,0	7,5	1102,24	249,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,128	726,99	833,73	84,94	31,46	48689	477,15	0,8895	538,73	154428,45	1,96
39	33,1	31,0	7,5	1095,61	248,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,123	720,59	834,98	85,07	31,43	46344	454,17	0,8884	513,44	146563,43	1,86
40	33	31,0	7,5	1089,00	247,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,118	713,95	836,16	85,20	31,41	44009	431,28	0,8872	488,23	138769,21	1,76
41	32,9	31,0	7,5	1082,41	246,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,112	707,03	837,26	85,32	31,38	41682	408,48	0,8859	463,09	131046,68	1,66
42	32,8	31,0	7,5	1075,84	246,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,107	699,81	838,30	85,43	31,36	39365	385,78	0,8845	438,03	123396,66	1,56
43	32,7	31,0	7,5	1069,29	245,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,101	692,27	839,33	85,54	31,33	37058	363,17	0,8830	413,05	115822,83	1,47
44	32,6	31,0	7,5	1062,76	244,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,096	684,36	840,37	85,65	31,31	34766	340,70	0,8816	388,14	108334,50	1,37
45	32,5	31,0	7,5	1056,25	243,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,090	676,04	841,40	85,75	31,28	32487	318,37	0,8801	363,31	100931,48	1,28
46	32,4	31,0	7,5	1049,76	243,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,085	667,27	842,43	85,86	31,26	30221	296,17	0,8786	338,55	93613,61	1,19
47	32,3	31,0	7,5	1043,29	242,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,079	657,99	843,46	85,96	31,24	27970	274,11	0,8771	313,88	86380,72	1,09
48	32,2	31,0	7,5	1036,84	241,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,073	648,13	844,49	86,07	31,21	25733	252,18	0,8755	289,27	79232,64	1,00
49	32,1	31,0	7,5	1030,41	240,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,067	637,59	845,51	86,17	31,19	23509	230,39	0,8740	264,75	72169,23	0,91
50	32	31,0	7,5	1024,00	240,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,062	626,27	846,53	86,28	31,17	21300	208,74	0,8724	240,30	65190,35	0,83
51	31,9	31,0	7,5	1017,61	239,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,056	614,01	847,55	86,38	31,15	19105	187,23	0,8708	215,93	58295,87	0,74
52	31,8	31,0	7,5	1011,24	238,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,050	600,64	848,57	86,48	31,13	16924	165,85	0,8692	191,63	51485,68	0,65
53	31,7	31,0	7,5	1004,89	237,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,044	585,88	849,58	86,59	31,11	14757	144,62	0,8676	167,41	44759,65	0,57
54	31,6	31,0	7,5	998,56	237,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,038	569,37	850,60	86,69	31,10	12605	123,53	0,8660	143,26	38117,67	0,48
55	31,5	31,0	7,5	992,25	236,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,031	550,56	851,61	86,80	31,08	10467	102,58	0,8643	119,20	31559,63	0,40
56	31,4	31,0	7,5	985,96	235,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,025	528,54	852,62	86,90	31,06	8344	81,77	0,8626	95,20	25085,40	0,32
57	31,3	31,0	7,5	979,69	234,75	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,019	501,72	853,62	87,00	31,04	6236	61,11	0,8609	71,29	18694,80	0,24
58	31,2	31,0	7,5	973,44	234,00	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,013	466,76	854,63	87,10	31,03	4142	40,59	0,8592	47,45	12387,61	0,16
59	31,1	31,0	7,5	967,21	233,25	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,006	413,96	855,63	87,21	31,01	2063	20,22	0,8574	23,69	6163,71	0,08
60	31	31,0	7,5	961,00	232,50	7,5	0,0	7,5	0,1309	0,000	355,00	856,63	87,31	31,00	0	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00
Сумма Σ	1830	2037	1860	450	69336,1	15278	450	0	7,85398	9,5804944	43910,776									

Проверка (по конечной стадии)	Искомые коэффициенты	$k_0 = 7,5000$ $k_1 = 0,0000$
-------------------------------------	-------------------------	----------------------------------

Расчет энергосиловых параметров радиального обжата бойками с параболическим профилем ($\alpha=7^{\circ}32'4'' \dots 7^{\circ}50'37''$)

Стадии процесса	Номер шага, i	Начальный диаметр d _н , мм	Конечный диаметр d _к , мм	Угол захватного конуса α _в в конечной точке i-ого шага, град. dec.	d _{z1}	d _{z2}	α _{расп} i	(α _{расп}) ^{1/3}	Угол захватного конуса i-ого шага α _{вв} град.	Угол захватного конуса i-ого шага α _{вв} рад	Относительная степень деформации ε _н i-ом шаге	Предел текучести обрабатываемого материала в конечной точке i-ого шага σ _{тв} МПа	Предел текучести обрабатываемого материала на i-ом шаге σ _{тв} МПа	Предел текучести обрабатываемого материала на i-ом шаге σ _{тв} кгс/см ²	Диаметр нейтральной поверхности на i-ом шаге d _н , мм	Усилие обжатия P _ж , кгс	Усилие обжатия P _ж , кН	Среднее удельное усилие P _{ср} , кН	Площадь проекции осяза деформации F _д , мм ²	Полная работа формоизменения A _{пр} , кН · мм	Мощность обжатия на i-ом шаге N _б , кВт
Начальная	0	37	37,0	7,5344	1369,00	278,77	7,5319	0,00	7,5319	0,13146	0,000	355,00	355,00	36,22	37,00	0	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00
	1	37	36,9	7,5394	1361,61	278,20	7,5371	0,00	7,5345	0,13150	0,005	413,96	384,48	39,23	36,91	1099	10,77	0,3855	28,06	3283,94	0,04
	2	37	36,8	7,5444	1354,24	277,63	7,5422	0,00	7,5371	0,13155	0,011	466,76	411,91	42,03	36,83	2357	23,10	0,4141	56,02	7051,33	0,09
	3	37	36,7	7,5494	1346,89	277,06	7,5474	0,00	7,5396	0,13159	0,016	501,72	434,36	44,32	36,74	3732	36,58	0,4379	83,89	11189,07	0,14
	4	37	36,6	7,5544	1339,56	276,49	7,5525	0,00	7,5422	0,13164	0,022	528,54	453,20	46,24	36,66	5197	50,93	0,4581	111,66	15619,54	0,20
	5	37	36,5	7,5594	1332,25	275,92	7,5577	0,00	7,5448	0,13168	0,027	550,56	469,42	47,90	36,58	6736	66,01	0,4758	139,34	20295,83	0,26
	6	37	36,4	7,5644	1324,96	275,34	7,5628	0,00	7,5474	0,13173	0,032	569,37	483,70	49,36	36,49	8337	81,70	0,4916	166,92	25187,11	0,32
	7	37	36,3	7,5694	1317,69	274,77	7,5680	0,00	7,5499	0,13177	0,037	585,88	496,47	50,66	36,41	9993	97,93	0,5059	194,41	30271,72	0,38
	8	37	36,2	7,5744	1310,44	274,19	7,5731	0,00	7,5525	0,13182	0,043	600,64	508,05	51,84	36,33	11698	114,64	0,5191	221,81	35593,69	0,45
	9	37	36,1	7,5794	1303,21	273,62	7,5783	0,00	7,5551	0,13186	0,048	614,01	518,64	52,92	36,25	13447	131,78	0,5313	249,11	40960,77	0,52
	10	37	36,0	7,5844	1296,00	273,04	7,5834	0,00	7,5577	0,13191	0,053	626,27	528,43	53,92	36,17	15237	149,33	0,5428	276,31	46543,33	0,59
	11	37	35,9	7,5894	1288,81	272,46	7,5886	0,00	7,5602	0,13195	0,059	637,59	537,52	54,85	36,09	17065	167,24	0,5536	303,42	52273,61	0,66
	12	37	35,8	7,5944	1281,64	271,88	7,5937	0,00	7,5628	0,13200	0,064	648,13	546,03	55,72	36,01	18929	185,50	0,5639	330,44	58145,27	0,74
	13	37	35,7	7,5994	1274,49	271,30	7,5989	0,00	7,5654	0,13204	0,069	657,99	554,03	56,53	35,93	20826	204,09	0,5736	357,36	64153,01	0,81
	14	37	35,6	7,6044	1267,36	270,72	7,6040	0,00	7,5680	0,13209	0,074	667,27	561,58	57,30	35,85	22754	222,99	0,5830	384,19	70292,42	0,89
	15	37	35,5	7,6094	1260,25	270,13	7,6092	0,00	7,5705	0,13213	0,079	676,04	568,73	58,03	35,77	24713	242,19	0,5920	410,93	76559,74	0,97
	16	37	35,4	7,6144	1253,16	269,55	7,6143	0,00	7,5731	0,13218	0,085	684,36	575,53	58,73	35,69	26700	261,66	0,6006	437,57	82951,77	1,05
	17	37	35,3	7,6197	1246,09	268,98	7,6195	0,00	7,5757	0,13222	0,090	692,27	582,02	59,39	35,62	28714	281,40	0,6090	464,11	89465,77	1,13
	18	37	35,2	7,6247	1239,04	268,39	7,6246	0,00	7,5783	0,13227	0,095	699,81	588,22	60,02	35,54	30755	301,40	0,6171	490,57	96099,39	1,22
	19	37	35,1	7,6297	1232,01	267,80	7,6298	0,00	7,5808	0,13231	0,100	707,03	594,16	60,63	35,46	32821	321,65	0,6250	516,93	102850,59	1,30
	20	37	35,0	7,6347	1225,00	267,21	7,6349	0,00	7,5834	0,13236	0,105	713,95	599,86	61,21	35,39	34912	342,14	0,6326	543,20	109717,63	1,39
	21	37	34,9	7,6400	1218,01	266,64	7,6401	0,00	7,5860	0,13240	0,110	720,59	605,35	61,77	35,31	37026	362,86	0,6401	569,37	116698,99	1,48
	22	37	34,8	7,6450	1211,04	266,05	7,6452	0,00	7,5886	0,13245	0,115	726,99	610,64	62,31	35,24	39163	383,80	0,6474	595,45	123793,39	1,57
	23	37	34,7	7,6500	1204,09	265,46	7,6504	0,00	7,5911	0,13249	0,120	733,15	615,75	62,83	35,16	41323	404,97	0,6545	621,44	130999,72	1,66
	24	37	34,6	7,6553	1197,16	264,87	7,6555	0,00	7,5937	0,13254	0,126	739,10	620,68	63,33	35,09	43505	426,34	0,6615	647,33	138317,03	1,75
	25	37	34,5	7,6603	1190,25	264,28	7,6607	0,00	7,5963	0,13258	0,131	744,85	625,45	63,82	35,02	45707	447,93	0,6684	673,13	145744,54	1,85
	26	37	34,4	7,6653	1183,36	263,69	7,6658	0,00	7,5989	0,13262	0,136	750,41	630,08	64,29	34,95	47931	469,72	0,6751	698,84	153281,60	1,94
	27	37	34,3	7,6706	1176,49	263,10	7,6710	0,00	7,6014	0,13267	0,141	755,81	634,57	64,75	34,87	50174	491,71	0,6817	724,46	160927,66	2,04
	28	37	34,2	7,6756	1169,64	262,51	7,6761	0,00	7,6040	0,13271	0,146	761,04	638,93	65,20	34,80	52438	513,89	0,6882	749,98	168682,31	2,14
	29	37	34,1	7,6808	1162,81	261,92	7,6813	0,00	7,6066	0,13276	0,151	766,12	643,17	65,63	34,73	54721	536,26	0,6947	775,41	176545,24	2,24
	30	37	34,0	7,6858	1156,00	261,32	7,6864	0,00	7,6092	0,13280	0,156	771,06	647,30	66,05	34,66	57023	558,83	0,7010	800,75	184516,23	2,34
	31	37	33,9	7,6911	1149,21	260,73	7,6916	0,00	7,6117	0,13285	0,161	775,86	651,32	66,46	34,59	59344	581,57	0,7072	826,00	192595,14	2,44
	32	37	33,8	7,6961	1142,44	260,13	7,6967	0,00	7,6143	0,13289	0,165	780,54	655,23	66,86	34,52	61684	604,50	0,7134	851,15	200781,92	2,54
	33	37	33,7	7,7014	1135,69	259,54	7,7019	0,00	7,6169	0,13294	0,170	785,10	659,05	67,25	34,45	64042	627,61	0,7195	876,21	209076,62	2,65
34	37	33,6	7,7067	1128,96	258,95	7,7070	0,00	7,6195	0,13298	0,175	789,54	662,78	67,63	34,38	66418	650,89	0,7255	901,18	217479,32	2,75	

35	37	33,5	7,7117	1122,25	258,34	7,7122	0,00	7,6220	0,13303	0,180	793,88	666,42	68,00	34,32	68812	674,35	0,7314	926,06	225990,21	2,86
36	37	33,4	7,7169	1115,56	257,74	7,7173	0,00	7,6246	0,13307	0,185	798,11	669,98	68,37	34,25	71223	697,99	0,7373	950,84	234609,54	2,97
37	37	33,3	7,7222	1108,89	257,15	7,7225	0,00	7,6272	0,13312	0,190	802,25	673,46	68,72	34,18	73552	721,79	0,7432	975,54	243337,60	3,08
38	37	33,2	7,7272	1102,24	256,54	7,7276	0,00	7,6298	0,13316	0,195	806,30	676,87	69,07	34,12	76098	745,76	0,7490	1000,14	252174,76	3,19
39	37	33,1	7,7325	1095,61	255,95	7,7328	0,00	7,6323	0,13321	0,200	810,25	680,20	69,41	34,05	78562	769,91	0,7547	1024,65	261121,45	3,31
40	37	33,0	7,7378	1089,00	255,35	7,7379	0,00	7,6349	0,13325	0,205	814,12	683,47	69,74	33,98	81042	791,22	0,7605	1049,07	270178,17	3,42
41	37	32,9	7,7431	1082,41	254,75	7,7431	0,00	7,6375	0,13330	0,209	817,52	686,66	70,07	33,92	83339	818,68	0,7661	1073,40	279341,66	3,54
42	37	32,8	7,7481	1075,84	254,14	7,7482	0,00	7,6401	0,13334	0,214	821,75	689,75	70,38	33,85	86047	843,26	0,7717	1097,63	288600,75	3,65
43	37	32,7	7,7533	1069,29	253,53	7,7534	0,00	7,6426	0,13338	0,219	823,85	692,75	70,69	33,79	88568	867,97	0,7772	1121,78	297956,54	3,77
44	37	32,6	7,7586	1062,76	252,93	7,7585	0,00	7,6452	0,13343	0,224	825,95	695,67	70,99	33,72	91101	892,79	0,7827	1145,83	307410,17	3,89
45	37	32,5	7,7639	1056,25	252,33	7,7637	0,00	7,6478	0,13348	0,228	828,04	698,50	71,28	33,66	93647	917,74	0,7881	1169,79	316962,80	4,01
46	37	32,4	7,7692	1049,76	251,72	7,7688	0,00	7,6504	0,13352	0,233	830,12	703,94	71,56	33,60	96205	942,81	0,7934	1193,67	326615,65	4,14
47	37	32,3	7,7744	1043,29	251,11	7,7740	0,00	7,6529	0,13357	0,238	832,20	706,56	72,10	33,47	101360	993,33	0,8039	1241,14	346226,96	4,38
48	37	32,2	7,7797	1036,84	250,51	7,7791	0,00	7,6555	0,13361	0,243	834,27	709,11	72,36	33,41	103957	1018,78	0,8092	1264,74	356188,01	4,51
49	37	32,1	7,7850	1030,41	249,90	7,7843	0,00	7,6581	0,13366	0,247	836,34	711,61	72,61	33,35	106568	1044,36	0,8143	1288,24	366254,43	4,64
50	37	32,0	7,7903	1024,00	249,29	7,7894	0,00	7,6607	0,13370	0,252	838,39	714,04	72,86	33,29	109191	1070,07	0,8195	1311,66	376427,62	4,77
51	37	31,9	7,7956	1017,61	248,68	7,7946	0,00	7,6632	0,13375	0,257	840,45	716,43	73,11	33,23	111828	1095,91	0,8246	1334,99	386708,99	4,90
52	37	31,8	7,8008	1011,24	248,07	7,7997	0,00	7,6658	0,13379	0,261	842,49	718,76	73,34	33,17	114478	1121,89	0,8297	1358,23	397100,00	5,03
53	37	31,7	7,8061	1004,89	247,45	7,8049	0,00	7,6684	0,13384	0,266	844,53	721,05	73,58	33,11	117143	1148,00	0,8348	1381,38	407602,13	5,16
54	37	31,6	7,8114	998,56	246,84	7,8100	0,00	7,6710	0,13388	0,271	846,56	723,29	73,81	33,05	119821	1174,25	0,8399	1404,43	418216,94	5,29
55	37	31,5	7,8167	992,25	246,23	7,8152	0,00	7,6735	0,13393	0,275	848,59	725,49	74,03	32,99	122513	1200,63	0,8449	1427,40	428945,98	5,43
56	37	31,4	7,8222	985,96	245,62	7,8203	0,00	7,6761	0,13397	0,280	850,61	727,65	74,25	32,93	125220	1227,16	0,8500	1450,28	439790,88	5,57
57	37	31,3	7,8275	979,69	245,00	7,8255	0,00	7,6787	0,13402	0,284	852,62	729,77	74,47	32,87	127941	1253,82	0,8550	1473,07	450753,30	5,71
58	37	31,2	7,8328	973,44	244,38	7,8306	0,00	7,6813	0,13406	0,289	854,63	731,85	74,68	32,81	130677	1280,64	0,8601	1495,76	461834,92	5,85
59	37	31,1	7,8381	967,21	243,76	7,8358	0,00	7,6838	0,13411	0,293	856,63	733,89	74,89	32,75	133428	1307,59	0,8651	1518,37	473037,51	5,99
60	37	31,0	7,8436	961,00	243,15	7,8409	0,00	7,6864	0,13415	0,298										
1830	2257	2074	468,91	70705,10	15933,08	468,87	0,00	464,16	8,10109											

k₀= 9,4374

k_i= -0,0515

Искомые коэффициенты

Сумма Σ

Основная

Номер шага, l	Начальный диаметр d _н , мм	Конечный диаметр d _к , мм	Угол заходного конуса α _в , град. dec.	d _н ²	d _н * α	α _{расч} l	(α _н - α _{расч}) l ²	Угол заходного конуса α _н , град.	Угол заходного конуса α _н , рад	Относительная степень деформации ε, в л-ом шаге	Предел текучести в конечной точке л-ого шага σ _{т расч} l, МПа	Предел текучести обработанного материала на л-ом шаге σ _н , МПа	Предел текучести обработанного материала на л-ом шаге σ _н , кгс	Диаметр нейтральной поверхности на л-ом шаге d _н , мм	Усилие обжатия Р _ж , кгс	Усилие обжатия Р _ж , кН	Среднее удельное усилие Р _{жс} , кН	Площадь проекции очага деформации F _н , мм ²	Полная работа формования A _н , кН · мм	Мощность обжатия на л-ом шаге N _б , кВт
1	36,9	31,0	7,5394	1361,61	278,20	7,5382	0,000	7,6901	0,13422	0,294	854,63	740,21	75,53	32,71	131712	1290,78	0,8701	1490,15	465842,36	5,90
2	36,8	31,0	7,5444	1354,24	277,63	7,5433	0,000	7,6927	0,13426	0,290	852,62	745,74	75,53	32,67	128896	1263,18	0,8678	1462,25	454770,33	5,76
3	36,7	31,0	7,5494	1346,89	277,06	7,5485	0,000	7,6952	0,13431	0,287	850,61	750,55	76,10	32,63	127045	1245,04	0,8719	1434,44	447141,86	5,66
4	36,6	31,0	7,5544	1339,56	276,49	7,5536	0,000	7,6978	0,13435	0,283	848,59	754,91	76,59	32,59	125056	1225,54	0,8752	1406,72	439057,59	5,56
5	36,5	31,0	7,5594	1332,25	275,92	7,5588	0,000	7,7004	0,13440	0,279	846,56	758,95	77,03	32,55	122981	1205,21	0,8779	1379,09	430707,36	5,45
6	36,4	31,0	7,5644	1324,96	275,34	7,5639	0,000	7,7030	0,13444	0,275	844,53	762,74	77,44	32,51	120845	1184,28	0,8802	1351,56	422179,19	5,34
7	36,3	31,0	7,5694	1317,69	274,77	7,5691	0,000	7,7055	0,13449	0,271	842,49	766,32	77,83	32,47	118663	1162,90	0,8822	1324,12	413525,55	5,24
8	36,2	31,0	7,5744	1310,44	274,19	7,5742	0,000	7,7081	0,13453	0,267	840,45	769,73	78,20	32,43	116444	1141,15	0,8840	1296,77	404781,81	5,12
9	36,1	31,0	7,5794	1303,21	273,62	7,5794	0,000	7,7107	0,13458	0,263	838,39	772,98	78,54	32,40	114196	1119,13	0,8856	1269,51	395973,67	5,01
10	36	31,0	7,5844	1296,00	273,04	7,5845	0,000	7,7133	0,13462	0,258	836,34	776,10	78,88	32,36	111925	1096,86	0,8869	1242,35	387120,75	4,90
11	35,9	31,0	7,5894	1288,81	272,46	7,5897	0,000	7,7158	0,13467	0,254	834,27	779,09	79,19	32,32	109633	1074,41	0,8881	1215,28	378238,62	4,79
12	35,8	31,0	7,5944	1281,64	271,88	7,5948	0,000	7,7184	0,13471	0,250	832,20	781,98	79,50	32,28	107326	1051,80	0,8892	1188,30	369339,89	4,68
13	35,7	31,0	7,5994	1274,49	271,30	7,6000	0,000	7,7210	0,13476	0,246	830,12	784,77	79,79	32,25	105006	1029,05	0,8901	1161,41	360435,07	4,56
14	35,6	31,0	7,6044	1267,36	270,72	7,6051	0,000	7,7236	0,13480	0,242	828,04	787,47	80,08	32,21	102674	1006,21	0,8909	1134,62	351533,02	4,45
15	35,5	31,0	7,6094	1260,25	270,13	7,6103	0,000	7,7261	0,13485	0,237	825,95	790,08	80,35	32,17	100334	983,28	0,8916	1107,91	342641,32	4,34
16	35,4	31,0	7,6144	1253,16	269,55	7,6154	0,000	7,7287	0,13489	0,233	823,85	792,61	80,62	32,14	97988	960,28	0,8921	1081,30	333766,53	4,23
17	35,3	31,0	7,6197	1246,09	268,98	7,6206	0,000	7,7313	0,13494	0,229	821,75	795,08	80,88	32,10	95636	937,23	0,8926	1054,78	324914,37	4,11
18	35,2	31,0	7,6247	1239,04	268,39	7,6257	0,000	7,7339	0,13498	0,224	819,64	797,47	81,13	32,06	93280	914,15	0,8930	1028,36	316089,89	4,00
19	35,1	31,0	7,6297	1232,01	267,80	7,6309	0,000	7,7364	0,13503	0,220	817,52	799,79	81,37	32,03	90922	891,04	0,8933	1002,02	307297,55	3,89
20	35	31,0	7,6347	1225,00	267,21	7,6360	0,000	7,7390	0,13507	0,216	815,42	802,05	81,61	31,99	88563	867,92	0,8936	975,78	298541,34	3,78
21	34,9	31,0	7,6400	1218,01	266,64	7,6412	0,000	7,7416	0,13512	0,211	813,25	804,26	81,84	31,96	86203	844,79	0,8937	949,62	289824,83	3,67
22	34,8	31,0	7,6450	1211,04	266,05	7,6463	0,000	7,7442	0,13516	0,206	811,06	806,40	82,07	31,93	83844	821,67	0,8938	923,56	281151,22	3,56
23	34,7	31,0	7,6500	1204,09	265,46	7,6515	0,000	7,7467	0,13521	0,202	808,25	808,49	82,29	31,89	81487	798,57	0,8938	897,59	272523,43	3,45
24	34,6	31,0	7,6553	1197,16	264,87	7,6566	0,000	7,7493	0,13525	0,197	798,11	810,53	82,50	31,86	79132	775,49	0,8937	871,71	263944,07	3,34
25	34,5	31,0	7,6603	1190,25	264,28	7,6618	0,000	7,7519	0,13530	0,193	793,88	812,51	82,71	31,83	76779	752,44	0,8936	845,93	255415,55	3,23
26	34,4	31,0	7,6653	1183,36	263,69	7,6669	0,000	7,7545	0,13534	0,188	789,54	814,45	82,91	31,79	74430	729,42	0,8934	820,23	246940,04	3,13
27	34,3	31,0	7,6706	1176,49	263,10	7,6721	0,000	7,7570	0,13539	0,183	785,10	816,33	83,11	31,76	72086	706,44	0,8931	794,62	238519,55	3,02
28	34,2	31,0	7,6756	1169,64	262,51	7,6772	0,000	7,7596	0,13543	0,178	780,54	818,16	83,30	31,73	69746	683,51	0,8928	769,11	230155,91	2,91
29	34,1	31,0	7,6808	1162,81	261,92	7,6824	0,000	7,7622	0,13548	0,174	775,86	819,95	83,49	31,70	67412	660,64	0,8924	743,68	221850,79	2,81
30	34	31,0	7,6858	1156,00	261,32	7,6875	0,000	7,7648	0,13552	0,169	771,06	821,68	83,67	31,67	65083	637,82	0,8920	718,35	213605,75	2,70
31	33,9	31,0	7,6911	1149,21	260,73	7,6927	0,000	7,7673	0,13557	0,164	766,12	823,37	83,85	31,64	62761	615,06	0,8915	693,10	205422,22	2,60
32	33,8	31,0	7,6961	1142,44	260,13	7,6978	0,000	7,7699	0,13561	0,159	761,04	825,01	84,02	31,61	60445	592,36	0,8909	667,95	197301,51	2,50
33	33,7	31,0	7,7014	1135,69	259,54	7,7030	0,000	7,7725	0,13566	0,154	755,81	826,60	84,18	31,58	58137	569,74	0,8903	642,89	189244,87	2,40
34	33,6	31,0	7,7067	1128,96	258,95	7,7081	0,000	7,7751	0,13570	0,149	750,41	828,13	84,35	31,55	55836	547,19	0,8897	617,91	181253,42	2,29
35	33,5	31,0	7,7117	1122,25	258,34	7,7133	0,000	7,7776	0,13575	0,144	744,85	829,62	84,50	31,52	53543	524,72	0,8889	593,03	173328,23	2,19
36	33,4	31,0	7,7169	1115,56	257,74	7,7184	0,000	7,7802	0,13579	0,139	739,10	831,05	84,65	31,49	51258	502,32	0,8881	568,24	165470,28	2,09
37	33,3	31,0	7,7222	1108,89	257,15	7,7236	0,000	7,7828	0,13584	0,133	733,15	832,42	84,80	31,47	48981	480,02	0,8872	543,54	157680,51	2,00

Конечная

38	33,2	31,0	7,7272	1102,24	256,54	7,7287	0,000	7,7854	0,13588	0,128	726,99	833,73	84,94	31,44	46714	457,79	0,8863	518,92	149959,80	1,90
39	33,1	31,0	7,7325	1095,61	255,95	7,7339	0,000	7,7879	0,13592	0,123	720,59	834,98	85,07	31,41	44455	435,66	0,8853	494,40	142308,96	1,80
40	33	31,0	7,7378	1089,00	255,35	7,7390	0,000	7,7905	0,13597	0,118	713,95	836,16	85,20	31,39	42206	413,62	0,8842	469,97	134728,77	1,71
41	32,9	31,0	7,7431	1082,41	254,75	7,7442	0,000	7,7937	0,13601	0,112	707,03	837,26	85,32	31,36	39967	391,68	0,8830	445,62	127220,00	1,61
42	32,8	31,0	7,7481	1075,84	254,14	7,7493	0,000	7,7957	0,13606	0,107	699,81	838,30	85,43	31,34	37738	369,83	0,8818	421,37	119783,35	1,52
43	32,7	31,0	7,7533	1069,29	253,53	7,7545	0,000	7,7982	0,13610	0,101	692,27	839,33	85,54	31,31	35520	348,10	0,8805	397,20	112422,29	1,42
44	32,6	31,0	7,7586	1062,76	252,93	7,7596	0,000	7,8008	0,13615	0,096	684,36	840,37	85,65	31,29	33316	326,50	0,8791	373,13	105145,77	1,33
45	32,5	31,0	7,7639	1056,25	252,33	7,7648	0,000	7,8034	0,13619	0,090	676,04	841,40	85,75	31,27	31126	305,04	0,8778	349,14	97953,53	1,24
46	32,4	31,0	7,7692	1049,76	251,72	7,7699	0,000	7,8060	0,13624	0,085	667,27	842,43	85,86	31,25	28951	283,72	0,8764	325,25	90845,29	1,15
47	32,3	31,0	7,7744	1043,29	251,11	7,7751	0,000	7,8085	0,13628	0,079	657,99	843,46	85,96	31,22	26789	262,54	0,8750	301,44	83820,80	1,06
48	32,2	31,0	7,7797	1036,84	250,51	7,7802	0,000	7,8111	0,13633	0,073	648,13	844,49	86,07	31,20	24642	241,49	0,8736	277,72	76879,83	0,97
49	32,1	31,0	7,7850	1030,41	249,90	7,7854	0,000	7,8137	0,13637	0,067	637,59	845,51	86,17	31,18	22509	220,59	0,8722	254,09	70022,14	0,89
50	32	31,0	7,7903	1024,00	249,29	7,7905	0,000	7,8163	0,13642	0,062	626,27	846,53	86,28	31,16	20390	199,83	0,8708	230,55	63247,50	0,80
51	31,9	31,0	7,7956	1017,61	248,68	7,7957	0,000	7,8188	0,13646	0,056	614,01	847,55	86,38	31,14	18286	179,20	0,8694	207,09	56555,72	0,72
52	31,8	31,0	7,8008	1011,24	248,07	7,8008	0,000	7,8214	0,13651	0,050	600,64	848,57	86,48	31,12	16196	158,72	0,8679	183,73	49946,58	0,63
53	31,7	31,0	7,8061	1004,89	247,45	7,8060	0,000	7,8240	0,13655	0,044	585,88	849,58	86,59	31,11	14120	138,38	0,8665	160,46	43419,90	0,55
54	31,6	31,0	7,8114	998,56	246,84	7,8111	0,000	7,8266	0,13660	0,038	569,37	850,60	86,69	31,09	12059	118,18	0,8650	137,27	36975,48	0,47
55	31,5	31,0	7,8167	992,25	246,23	7,8163	0,000	7,8291	0,13664	0,031	550,56	851,61	86,80	31,07	10012	98,12	0,8635	114,17	30613,12	0,39
56	31,4	31,0	7,8222	985,96	245,62	7,8214	0,000	7,8317	0,13669	0,025	528,54	852,62	86,90	31,06	7980	78,21	0,8619	91,16	24332,62	0,31
57	31,3	31,0	7,8275	979,69	245,00	7,8266	0,000	7,8343	0,13673	0,019	501,72	853,62	87,00	31,04	5963	58,44	0,8604	68,24	18133,72	0,23
58	31,2	31,0	7,8328	973,44	244,38	7,8317	0,000	7,8369	0,13678	0,013	466,76	854,63	87,10	31,03	3960	38,81	0,8588	45,40	12016,12	0,15
59	31,1	31,0	7,8381	967,21	243,76	7,8369	0,000	7,8394	0,13682	0,006	413,96	855,63	87,21	31,01	1973	19,33	0,8572	22,66	5979,63	0,08
60	31	31,0	7,8436	961,00	243,15	7,8420	0,000	7,8420	0,13687	0,000	355,00	856,63	87,31	31,00	0	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00
Сумма Σ	1830	2037	1860	461,3719	69336,1	15654,3058	461,405	0,000	465,9623	8,13257545										

Проверка (по конечной стадии)	Искомые коэффициенты	$K_0 = 9,4385$ $K_1 = -0,0515$
-------------------------------------	-------------------------	-----------------------------------

Расчет энергосиловых параметров радиального обжатия бойками с гиперболическим профилем ($\alpha=9^{\circ}24' \dots 14^{\circ}2'$)

Номер шага, i	Начальный диаметр d_p , мм	Конечный диаметр i -ого шага d_{pi} , мм	Угол заходного конуса α_p , в конечной точке i -ого шага, град, дес.	d_{pi}^2	$\alpha_{расч}^2$	$(\alpha_{расч})^3$	Угол заходного конуса α_{pi} , град	Угол заходного конуса α_{pi} , рад	Относительная степень деформации ϵ_i на i -ом шаге	Линейная деформация Δl на i -ом шаге, мм	Линейная деформация Δl на i -ом шаге, мм	Линейная деформация Δl на i -ом шаге, мм	Линейная деформация Δl на i -ом шаге, мм	Усиление обжатия R_{pi} , кгс	Усиление обжатия R_{pi} , кН	Среднее усилие $P_{ср}$, кН	Площадь проекции очага деформации $F_{пр}$, мм ²	Полная работа формоизменения $A_{пр}$, кН · мм	Мощность обжатия на i -ом шаге N_p , кВт
0	37	37,0	9,4000	1369,00	347,80	9,3050	0,0090	0,16240	0,0000	355,00	36,22	37,00	0,00	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00
1	37	36,9	9,4667	1361,61	349,32	9,3436	0,0071	0,16308	0,0005	413,96	39,23	36,91	22,61	0,3852	8,65	0,3852	22,61	2846,66	0,04
2	37	36,8	9,5333	1354,24	350,83	9,4595	0,0055	0,16375	0,011	466,76	42,03	36,82	44,97	0,4135	18,85	0,4135	44,97	6088,44	0,08
3	37	36,7	9,6000	1346,89	352,32	9,5367	0,0040	0,16442	0,016	501,72	44,36	36,72	67,08	0,4369	29,11	0,4369	67,08	9627,44	0,12
4	37	36,6	9,6667	1339,56	353,80	9,6139	0,0028	0,16510	0,022	528,54	46,24	36,63	88,96	0,4566	40,34	0,4566	88,96	13394,05	0,17
5	37	36,5	9,7500	1332,25	355,88	9,6912	0,0035	0,16577	0,027	550,56	47,90	36,54	110,59	0,4738	52,04	0,4738	110,59	17345,76	0,22
6	37	36,4	9,8167	1324,96	357,33	9,7684	0,0023	0,16645	0,032	569,37	49,36	36,45	131,99	0,4891	64,11	0,4891	131,99	21454,26	0,27
7	37	36,3	9,8833	1317,69	358,76	9,8456	0,0014	0,16712	0,037	585,88	50,66	36,36	153,15	0,5029	76,48	0,5029	153,15	25699,35	0,33
8	37	36,2	9,9500	1310,44	360,19	9,9228	0,0007	0,16779	0,043	600,64	51,84	36,27	174,09	0,5155	89,11	0,5155	174,09	30065,88	0,38
9	37	36,1	10,0167	1303,21	361,60	10,0001	0,0003	0,16847	0,048	614,01	52,92	36,18	194,80	0,5271	101,95	0,5271	194,80	34542,02	0,44
10	37	36,0	10,0833	1296,00	363,00	10,0773	0,0000	0,16914	0,053	626,27	53,92	36,09	215,28	0,5380	114,98	0,5380	215,28	39118,27	0,50
11	37	35,9	10,1667	1288,81	364,98	10,1545	0,0001	0,16982	0,059	637,59	54,85	36,01	235,54	0,5481	128,17	0,5481	235,54	43786,79	0,55
12	37	35,8	10,2333	1281,64	366,35	10,2318	0,0000	0,17049	0,064	648,13	55,72	35,92	255,58	0,5577	141,49	0,5577	255,58	48541,02	0,61
13	37	35,7	10,3000	1274,49	367,71	10,3090	0,0001	0,17116	0,069	657,99	56,53	35,83	275,41	0,5667	154,92	0,5667	275,41	53375,36	0,68
14	37	35,6	10,3667	1267,36	369,05	10,3862	0,0004	0,17184	0,074	667,27	57,30	35,74	295,02	0,5753	168,46	0,5753	295,02	58284,97	0,74
15	37	35,5	10,4500	1260,25	370,98	10,4635	0,0002	0,17251	0,079	676,04	58,03	35,66	314,41	0,5835	182,08	0,5835	314,41	63265,60	0,80
16	37	35,4	10,5167	1253,16	372,29	10,5407	0,0006	0,17319	0,085	684,36	58,73	35,57	333,60	0,5913	195,78	0,5913	333,60	68313,54	0,86
17	37	35,3	10,6000	1246,09	374,18	10,6179	0,0003	0,17386	0,090	692,27	59,39	35,48	352,58	0,5988	209,53	0,5988	352,58	73425,46	0,93
18	37	35,2	10,6667	1239,04	375,47	10,6951	0,0008	0,17453	0,095	699,81	60,02	35,40	371,36	0,6061	223,34	0,6061	371,36	78598,39	1,00
19	37	35,1	10,7333	1232,01	376,74	10,7724	0,0015	0,17521	0,100	707,03	60,63	35,31	389,93	0,6130	237,19	0,6130	389,93	83829,64	1,06
20	37	35,0	10,8167	1225,00	378,58	10,8496	0,0011	0,17588	0,105	713,95	61,21	35,23	408,31	0,6197	251,08	0,6197	408,31	89116,79	1,13
21	37	34,9	10,8833	1218,01	379,83	10,9268	0,0019	0,17656	0,110	720,59	61,77	35,15	426,49	0,6262	264,99	0,6262	426,49	94457,62	1,20
22	37	34,8	10,9667	1211,04	381,64	11,0041	0,0014	0,17723	0,115	726,99	62,31	35,06	444,47	0,6325	278,92	0,6325	444,47	99850,12	1,26
23	37	34,7	11,0333	1204,09	382,86	11,0813	0,0023	0,17790	0,120	733,15	62,83	34,98	462,26	0,6386	292,86	0,6386	462,26	105292,43	1,33
24	37	34,6	11,1167	1197,16	384,64	11,1585	0,0017	0,17858	0,126	739,10	63,33	34,90	479,86	0,6446	306,81	0,6446	479,86	110782,83	1,40
25	37	34,5	11,1833	1190,25	385,82	11,2358	0,0028	0,17925	0,131	744,85	63,82	34,81	497,26	0,6503	320,77	0,6503	497,26	116319,77	1,47
26	37	34,4	11,2667	1183,36	387,57	11,3130	0,0021	0,17993	0,136	750,41	64,29	34,73	514,49	0,6559	334,72	0,6559	514,49	121901,77	1,54
27	37	34,3	11,3333	1176,49	388,73	11,3902	0,0032	0,18060	0,141	755,81	64,75	34,65	531,52	0,6614	348,66	0,6614	531,52	127527,49	1,61
28	37	34,2	11,4167	1169,64	390,45	11,4674	0,0026	0,18127	0,146	761,04	65,20	34,57	548,38	0,6667	362,59	0,6667	548,38	133195,67	1,69
29	37	34,1	11,5000	1162,81	392,15	11,5447	0,0020	0,18195	0,151	766,12	65,63	34,49	565,05	0,6719	376,50	0,6719	565,05	138905,15	1,76
30	37	34,0	11,5667	1156,00	393,27	11,6219	0,0030	0,18262	0,156	771,06	66,05	34,41	581,55	0,6770	390,39	0,6770	581,55	144654,83	1,83
31	37	33,9	11,6500	1149,21	394,93	11,6991	0,0024	0,18330	0,161	775,86	66,46	34,33	597,87	0,6819	404,26	0,6819	597,87	150443,71	1,90
32	37	33,8	11,7333	1142,44	396,59	11,7764	0,0019	0,18397	0,165	780,54	66,86	34,25	614,02	0,6868	418,10	0,6868	614,02	156270,84	1,98
33	37	33,7	11,8000	1135,69	397,66	11,8536	0,0029	0,18464	0,170	785,10	67,25	34,17	629,99	0,6915	431,91	0,6915	629,99	162135,34	2,05
34	37	33,6	11,8833	1128,96	399,28	11,9308	0,0023	0,18532	0,175	789,54	67,63	34,09	645,79	0,6962	445,69	0,6962	645,79	168036,37	2,13
35	37	33,5	11,9667	1122,25	400,88	12,0081	0,0017	0,18599	0,180	793,88	68,00	34,01	661,42	0,7007	459,43	0,7007	661,42	173973,19	2,20
36	37	33,4	12,0333	1115,56	401,91	12,0853	0,0027	0,18667	0,185	798,11	68,37	33,93	676,89	0,7052	473,14	0,7052	676,89	179945,05	2,28
37	37	33,3	12,1167	1108,89	403,49	12,1625	0,0021	0,18734	0,190	802,25	68,72	33,85	692,19	0,7095	486,81	0,7095	692,19	185951,30	2,35

Начальная

38	37	33,2	12,2000	1102,24	405,04	12,2397	0,0016	10,7724	0,18801	0,195	806,30	676,87	69,07	33,77	51064	500,43	0,7138	707,33	191991,31	2,43
39	37	33,1	12,2833	1095,61	406,58	12,3170	0,0011	10,8110	0,18869	0,200	810,25	680,20	69,41	33,70	52450	514,01	0,7181	722,30	198064,49	2,51
40	37	33,0	12,3667	1089,00	408,10	12,3942	0,0008	10,8496	0,18936	0,205	814,12	683,47	69,74	33,62	53831	527,54	0,7222	737,12	204170,30	2,58
41	37	32,9	12,4333	1082,41	409,06	12,4714	0,0015	10,8882	0,19004	0,209	817,52	686,66	70,07	33,54	55206	541,02	0,7263	751,77	210305,40	2,66
42	37	32,8	12,5167	1075,84	410,55	12,5487	0,0010	10,9268	0,19071	0,214	819,64	689,75	70,38	33,47	56574	554,42	0,7302	766,27	216460,50	2,74
43	37	32,7	12,6000	1069,29	412,02	12,6259	0,0007	10,9654	0,19138	0,219	821,75	692,75	70,69	33,39	57933	567,74	0,7341	780,62	222635,64	2,82
44	37	32,6	12,6833	1062,76	413,48	12,7031	0,0004	11,0041	0,19206	0,224	823,85	695,67	70,99	33,32	59284	580,98	0,7378	794,81	228830,87	2,90
45	37	32,5	12,7667	1056,25	414,92	12,7804	0,0002	11,0427	0,19273	0,228	825,95	698,50	71,28	33,24	60627	594,15	0,7415	808,85	235046,26	2,98
46	37	32,4	12,8500	1049,76	416,34	12,8576	0,0001	11,0813	0,19340	0,233	828,04	701,25	71,56	33,17	61962	607,23	0,7451	822,74	241281,87	3,05
47	37	32,3	12,9333	1043,29	417,75	12,9348	0,0000	11,1199	0,19408	0,238	830,12	703,94	71,83	33,02	63290	620,24	0,7486	836,48	247537,80	3,13
48	37	32,2	13,0167	1036,84	419,14	13,0120	0,0000	11,1585	0,19475	0,243	832,20	706,56	72,10	33,09	64609	633,17	0,7520	850,08	253814,14	3,21
49	37	32,1	13,1000	1030,41	420,51	13,0893	0,0001	11,1971	0,19543	0,247	834,27	709,11	72,36	32,94	65920	646,01	0,7554	863,52	260111,01	3,29
50	37	32,0	13,1833	1024,00	421,87	13,1665	0,0003	11,2358	0,19610	0,252	836,34	711,61	72,61	32,87	67223	658,79	0,7587	876,83	266428,53	3,37
51	37	31,9	13,2667	1017,61	423,21	13,2437	0,0005	11,2744	0,19677	0,257	838,39	714,04	72,86	32,80	68519	671,48	0,7619	889,99	272766,83	3,45
52	37	31,8	13,3500	1011,24	424,53	13,3210	0,0008	11,3130	0,19745	0,261	840,45	716,43	73,11	32,72	69806	684,10	0,7651	903,01	279126,07	3,53
53	37	31,7	13,4333	1004,89	425,84	13,3982	0,0012	11,3516	0,19812	0,266	842,49	718,76	73,34	32,65	71086	696,64	0,7682	915,89	285506,39	3,61
54	37	31,6	13,5167	998,56	427,13	13,4754	0,0017	11,3902	0,19880	0,271	844,53	721,05	73,58	32,58	72358	709,11	0,7713	928,64	291907,98	3,70
55	37	31,5	13,6000	992,25	428,40	13,5527	0,0022	11,4288	0,19947	0,275	846,56	723,29	73,81	32,51	73622	721,50	0,7743	941,24	298331,01	3,78
56	37	31,4	13,6833	985,96	429,66	13,6299	0,0029	11,4674	0,20014	0,280	848,59	725,49	74,03	32,44	74879	733,81	0,7773	953,71	304775,67	3,86
57	37	31,3	13,7667	979,69	430,90	13,7071	0,0036	11,5061	0,20082	0,284	850,61	727,65	74,25	32,37	76128	746,05	0,7802	966,05	311242,16	3,94
58	37	31,2	13,8500	973,44	432,12	13,7843	0,0043	11,5447	0,20149	0,289	852,62	729,77	74,47	32,29	77369	758,22	0,7831	978,25	317730,70	4,02
59	37	31,1	13,9500	967,21	433,84	13,8616	0,0078	11,5833	0,20217	0,293	854,63	731,85	74,68	32,22	78603	770,31	0,7859	990,32	324241,52	4,11
Основная	60	37	31,0	14,0333	961,00	435,03	0,0089	11,6219	0,20284	0,298	856,63	733,89	74,89	32,15	79829	782,32	0,7887	1002,27	330774,84	4,19
Сумма Z	1830	2257	2074	708,85	23954,85	708,94	0,1225	638,27	11,13992											
Искомые коэффициенты																				
k ₀ = 37,8801																				
k ₁ = -0,7723																				

Номер шага, i	Начальный диаметр d_0 , мм	Конечный диаметр d_n , мм	Угол заходного конуса α_0 , град.	$d_{нi}$	$d_{нi}^2$	$d_{нi}^3$	$(\alpha_{раск})^2$	Угол заходного конуса α_{0n} , град.	Угол заходного конуса α_{0n} , рад	Относительная степень деформации ϵ_n на i-ом шаге	Предельная деформация в конечной точке i-ого шага $\epsilon_{раск,i}$, МПа	Предельная деформация на i-ом шаге $\epsilon_{0n,i}$, МПа	Предельная температура на i-ом шаге $\epsilon_{0n,i}$, К	Диаметр нейтральной поверхности на i-ом шаге d_0 , мм	Удельная нагрузка $P_{нi}$, кгс	Удельная нагрузка $P_{нi}$, кН	Среднее удельное усилие $F_{нi}$, кН	Площадь проекции очага деформации $F_{нi}$, мм ²	Полная работа формоизменения $A_{нi}$, кН · мм	Мощность обжатия на i-ом шаге N_i , кВт
1	36,9	31,0	9,4667	1361,61	349,32	9,3734	0,0087	11,6567	0,20345	0,294	854,63	740,21	75,53	32,12	78673	771,00	0,7941	981,15	325584,63	4,12
2	36,8	31,0	9,5333	1354,24	350,83	9,4508	0,0088	11,6954	0,20412	0,290	852,62	745,74	75,53	32,08	78822	752,85	0,7926	959,89	317574,18	4,02
3	36,7	31,0	9,6000	1346,89	352,32	9,5282	0,0032	11,7341	0,20480	0,287	850,61	750,55	76,10	32,04	75554	740,43	0,7971	938,83	311990,21	3,95
4	36,6	31,0	9,6667	1339,56	353,80	9,6056	0,0037	11,7728	0,20547	0,283	848,59	754,91	76,59	32,00	74213	727,28	0,8008	917,94	306107,59	3,88
5	36,5	31,0	9,7500	1332,25	355,88	9,6830	0,0045	11,8115	0,20615	0,279	846,56	758,95	77,03	31,97	72828	713,72	0,8041	897,25	300058,70	3,80
6	36,4	31,0	9,8167	1324,96	357,33	9,7604	0,0032	11,8502	0,20683	0,275	844,53	762,74	77,44	31,93	71416	699,87	0,8070	876,74	293504,61	3,72
7	36,3	31,0	9,8833	1317,69	358,76	9,8378	0,0021	11,8889	0,20750	0,271	842,49	766,32	77,83	31,89	69984	685,84	0,8096	856,41	287681,47	3,64
8	36,2	31,0	9,9500	1310,44	360,19	9,9152	0,0012	11,9276	0,20818	0,267	840,45	769,73	78,20	31,86	68538	671,68	0,8121	836,26	281413,40	3,56
9	36,1	31,0	10,0167	1303,21	361,60	9,9926	0,0006	11,9663	0,20885	0,263	838,39	772,98	78,54	31,82	67083	657,42	0,8143	816,29	275117,74	3,48
10	36	31,0	10,0833	1296,00	363,00	10,0700	0,0002	12,0050	0,20953	0,258	836,34	776,10	78,88	31,79	65622	643,10	0,8164	796,49	268807,57	3,40
11	35,9	31,0	10,1667	1288,81	364,98	10,1474	0,0004	12,0437	0,21020	0,254	834,27	779,09	79,19	31,75	64157	628,74	0,8184	776,88	262493,09	3,32
12	35,8	31,0	10,2333	1281,64	366,35	10,2248	0,0001	12,0824	0,21088	0,250	832,20	781,98	79,50	31,72	62690	614,36	0,8203	757,43	256182,47	3,24
13	35,7	31,0	10,3000	1274,49	367,71	10,3022	0,0000	12,1211	0,21155	0,246	830,12	784,77	79,79	31,69	61222	599,98	0,8221	738,16	249882,36	3,16
14	35,6	31,0	10,3667	1267,36	369,05	10,3796	0,0002	12,1598	0,21223	0,242	828,04	787,47	80,08	31,66	59756	585,60	0,8238	719,06	243598,28	3,08
15	35,5	31,0	10,4500	1260,25	370,98	10,5344	0,0000	12,1985	0,21290	0,237	825,95	790,08	80,35	31,62	58291	571,25	0,8254	700,12	237334,86	3,00
16	35,4	31,0	10,5167	1253,16	372,29	10,6118	0,0003	12,2372	0,21358	0,233	823,85	792,61	80,62	31,59	56829	556,93	0,8269	681,36	231096,01	2,93
17	35,3	31,0	10,6000	1246,09	374,18	10,6892	0,0001	12,2759	0,21425	0,229	821,75	795,08	80,88	31,56	55371	542,64	0,8283	662,76	224885,05	2,85
18	35,2	31,0	10,6667	1239,04	375,47	10,7666	0,0005	12,3146	0,21493	0,224	819,64	797,47	81,13	31,53	53918	528,39	0,8297	644,32	218704,85	2,77
19	35,1	31,0	10,7333	1232,01	376,74	10,8440	0,0011	12,3533	0,21561	0,220	817,52	799,79	81,37	31,50	52469	514,20	0,8311	626,05	212557,87	2,69
20	35	31,0	10,8167	1225,00	378,58	10,9214	0,0007	12,3920	0,21628	0,216	815,42	802,05	81,61	31,47	51026	500,06	0,8324	607,94	206446,73	2,61
21	34,9	31,0	10,8833	1218,01	379,83	10,9988	0,0015	12,4307	0,21696	0,211	813,25	804,26	81,84	31,45	49589	485,97	0,8336	589,98	200371,80	2,54
22	34,8	31,0	10,9667	1211,04	381,64	11,0762	0,0010	12,4694	0,21763	0,206	811,09	806,40	82,07	31,42	48158	471,95	0,8348	572,19	194336,17	2,46
23	34,7	31,0	11,0333	1204,09	382,86	11,1536	0,0018	12,5081	0,21831	0,202	808,95	808,49	82,29	31,39	46734	458,00	0,8359	554,55	188340,74	2,38
24	34,6	31,0	11,1167	1197,16	384,64	11,2310	0,0014	12,5468	0,21898	0,197	798,11	810,53	82,50	31,37	45317	444,11	0,8370	537,06	182386,73	2,31
25	34,5	31,0	11,1833	1190,25	385,82	11,3084	0,0023	12,5855	0,21966	0,193	793,88	812,51	82,71	31,34	43907	430,29	0,8381	519,73	176475,21	2,23
26	34,4	31,0	11,2667	1183,36	387,57	11,3858	0,0017	12,6242	0,22033	0,188	789,54	814,45	82,91	31,32	42505	416,55	0,8391	502,55	170607,08	2,16
27	34,3	31,0	11,3333	1176,49	388,73	11,4632	0,0028	12,6629	0,22101	0,183	785,10	816,33	83,11	31,29	41110	402,87	0,8401	485,53	164783,15	2,09
28	34,2	31,0	11,4167	1169,64	390,45	11,5406	0,0022	12,7016	0,22168	0,178	780,54	818,16	83,30	31,27	39722	389,28	0,8411	468,65	159004,13	2,01
29	34,1	31,0	11,5000	1162,81	392,15	11,6180	0,0016	12,7403	0,22236	0,174	775,86	819,95	83,49	31,25	38343	375,76	0,8420	451,92	153270,60	1,94
30	34	31,0	11,5667	1156,00	393,27	11,6954	0,0026	12,7790	0,22304	0,169	771,06	821,68	83,67	31,23	36972	362,32	0,8429	435,34	147583,08	1,87
31	33,9	31,0	11,6500	1149,21	394,93	11,7728	0,0021	12,8177	0,22371	0,164	766,12	823,37	83,85	31,20	35609	348,96	0,8437	418,90	141942,03	1,80
32	33,8	31,0	11,7333	1142,44	396,59	11,8502	0,0016	12,8564	0,22439	0,159	761,04	825,01	84,02	31,18	34254	335,68	0,8445	402,60	136347,82	1,73
33	33,7	31,0	11,8000	1135,69	397,66	11,9276	0,0025	12,8951	0,22506	0,154	755,81	826,60	84,18	31,16	32907	322,49	0,8453	386,45	130800,76	1,66
34	33,6	31,0	11,8833	1128,96	399,28	12,0050	0,0020	12,9338	0,22574	0,149	750,41	828,13	84,35	31,15	31569	309,37	0,8460	370,44	125301,14	1,59
35	33,5	31,0	11,9667	1122,25	400,88	12,0824	0,0015	12,9725	0,22641	0,144	744,85	829,62	84,50	31,13	30239	296,34	0,8467	354,57	119849,18	1,52
36	33,4	31,0	12,0333	1115,56	401,91	12,1598	0,0024	13,0112	0,22709	0,139	739,10	831,05	84,65	31,11	28917	283,39	0,8474	338,84	114445,06	1,45
37	33,3	31,0	12,1167	1108,89	403,49	12,2372	0,0019	13,0499	0,22776	0,133	733,15	832,42	84,80	31,09	27604	270,52	0,8480	323,25	109088,94	1,38
38	33,2	31,0	12,2000	1102,24	405,04	12,3146	0,0014	13,0886	0,22844	0,128	726,99	833,73	84,94	31,08	26300	257,74	0,8485	307,80	103780,94	1,31

Конечная

39	33,1	31,0	12,2833	1095,61	406,58	12,3146	0,0010	13,1273	0,22911	0,123	720,59	834,98	85,07	31,06	25004	245,04	0,8490	292,48	98521,17	1,25
40	33	31,0	12,3667	1089,00	408,10	12,3920	0,0006	13,1660	0,22979	0,118	713,95	836,16	85,20	31,05	23716	232,42	0,8495	277,29	93309,72	1,18
41	32,9	31,0	12,4333	1082,41	409,06	12,4694	0,0013	13,2047	0,23047	0,112	707,03	837,26	85,32	31,04	22438	219,89	0,8499	262,23	88146,64	1,12
42	32,8	31,0	12,5167	1075,84	410,55	12,5468	0,0009	13,2434	0,23114	0,107	699,81	838,30	85,43	31,03	21168	207,44	0,8502	247,31	83032,01	1,05
43	32,7	31,0	12,6000	1069,29	412,02	12,6242	0,0006	13,2821	0,23182	0,101	692,27	839,33	85,54	31,02	19907	195,08	0,8505	232,52	77967,79	0,99
44	32,6	31,0	12,6833	1062,76	413,48	12,7016	0,0003	13,3208	0,23249	0,096	684,36	840,37	85,65	31,01	18656	182,83	0,8508	217,86	72959,78	0,92
45	32,5	31,0	12,7667	1056,25	414,92	12,7790	0,0002	13,3595	0,23317	0,090	676,04	841,40	85,75	31,00	17416	170,68	0,8511	203,33	68007,40	0,86
46	32,4	31,0	12,8500	1049,76	416,34	12,8564	0,0000	13,3982	0,23384	0,085	667,27	842,43	85,86	30,99	16187	158,63	0,8514	188,92	63110,09	0,80
47	32,3	31,0	12,9333	1043,29	417,75	12,9338	0,0000	13,4369	0,23452	0,079	657,99	843,46	85,96	30,98	14967	146,68	0,8517	174,64	58267,28	0,74
48	32,2	31,0	13,0167	1036,84	419,14	13,0112	0,0000	13,4756	0,23519	0,073	648,13	844,49	86,07	30,98	13758	134,83	0,8520	160,48	53478,45	0,68
49	32,1	31,0	13,1000	1030,41	420,51	13,0886	0,0001	13,5143	0,23587	0,067	637,59	845,51	86,17	30,97	12559	123,08	0,8523	146,45	48743,09	0,62
50	32	31,0	13,1833	1024,00	421,87	13,1660	0,0003	13,5530	0,23654	0,062	626,27	846,53	86,28	30,97	11369	111,42	0,8527	132,55	44060,69	0,56
51	31,9	31,0	13,2667	1017,61	423,21	13,2434	0,0005	13,5917	0,23722	0,056	614,01	847,55	86,38	30,97	10190	99,86	0,8530	118,76	39430,78	0,50
52	31,8	31,0	13,3500	1011,24	424,53	13,3208	0,0009	13,6304	0,23790	0,050	600,64	848,57	86,48	30,97	9020	88,39	0,8533	105,09	34852,88	0,44
53	31,7	31,0	13,4333	1004,89	425,84	13,3982	0,0012	13,6691	0,23857	0,044	585,88	849,58	86,59	30,97	7860	77,02	0,8536	91,55	30326,53	0,38
54	31,6	31,0	13,5167	998,56	427,13	13,4756	0,0017	13,7078	0,23925	0,038	569,37	850,60	86,69	30,97	6709	65,75	0,8539	78,12	25851,26	0,33
55	31,5	31,0	13,6000	992,25	428,40	13,5530	0,0022	13,7465	0,23992	0,031	550,56	851,61	86,80	30,97	5567	54,56	0,8542	64,81	21426,61	0,27
56	31,4	31,0	13,6833	985,96	429,66	13,6304	0,0028	13,7852	0,24060	0,025	528,54	852,62	86,90	30,97	4495	43,47	0,8545	51,62	17052,06	0,22
57	31,3	31,0	13,7667	979,69	430,90	13,7078	0,0035	13,8239	0,24127	0,019	501,72	853,62	87,00	30,98	3313	32,46	0,8548	38,54	12727,04	0,16
58	31,2	31,0	13,8500	973,44	432,12	13,7852	0,0042	13,8626	0,24195	0,013	466,76	854,63	87,10	30,98	2199	21,55	0,8551	25,58	8450,84	0,11
59	31,1	31,0	13,9500	967,21	433,84	13,8626	0,0076	13,9013	0,24262	0,006	413,96	855,63	87,21	30,99	1095	10,73	0,8554	12,73	4222,96	0,05
60	31	31,0	14,0333	961,00	435,03	13,9400	0,0087	13,9400	0,24330	0,000	355,00	856,63	87,31	31,00	0	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00
Сумма Σ	1830	2037	1860	699,4501	69336,1	23607,0537	699,402	0,1124327	767,901	13,402401										

Проверка (по конечной стадии)	Искомые коэффициенты	$k_0 = 37,9340$ $k_1 = -0,7740$
--	-------------------------	------------------------------------

Расчет энергосиловых параметров радиального обжатия бойками с логарифмическим профилем ($\alpha=7'42''...8'51''$)

Стадии процесса	Номер шага, i	Начальный диаметр d_0 , мм	Конечный диаметр d_n , мм	Угол заходного конуса α_0 в конечной точке i -ого шага, град. дес.	d_{z1}	$d_{z2}^* \alpha$	$\alpha_{расч} i^2$	Угол заходного конуса i -ого шага α_{0i} град.	Угол заходного конуса i -ого шага $\alpha_{расч} i$ град.	Относительная степень деформации ϵ_i на i -ом шаге	Предварительная обработка материала в конечной точке i -ого шага $\alpha_{расч} i$, МПа	Предварительная обработка материала на i -ом шаге $\alpha_{расч} i$, МПа	Предварительная обработка материала на i -ом шаге $\alpha_{расч} i$, кс	Предел текучести i -ом шаге $\sigma_{тш} i$, кс	Предел текучести i -ом шаге $\sigma_{тш} i$, кс	Диаметр нейтральной поверхности на i -ом шаге d_{0i} , мм	Усилие обжатия F_{0i} , кс	Усилие обжатия F_{0i} , кН	Среднее удельное усилие P_{0i} , кН	Площадь проекции очка деформации F_{0i} , мм ²	Полная работа формоизменения A_{0i} , кН · мм	Мощность обжатия на i -ом шаге N_{0i} , кВт
Начальная	0	37	37,0	7,7000	1369,00	284,90	0,00025	7,7159	0,13467	0,000	355,00	355,00	36,22	37,00	0	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	37	36,9	7,7167	1361,61	284,75	0,00036	7,7258	0,13484	0,005	413,96	384,48	39,23	36,91	1071	10,50	0,3855	27,36	32,27,88	0,04	32,27,88	0,04
	2	37	36,8	7,7333	1354,24	284,59	0,00049	7,7357	0,13501	0,011	466,76	411,91	42,03	36,83	2295	22,50	0,4141	54,58	69,25,33	0,09	69,25,33	0,09
	3	37	36,7	7,7500	1346,89	284,43	0,00064	7,7553	0,13519	0,016	501,72	434,36	44,32	36,74	3631	35,58	0,4378	81,65	109,80,60	0,14	109,80,60	0,14
	4	37	36,6	7,7667	1339,56	284,26	0,00080	7,7555	0,13536	0,022	528,54	453,20	46,24	36,66	5050	49,49	0,4579	108,58	153,16,69	0,19	153,16,69	0,19
	5	37	36,5	7,7800	1332,25	284,70	0,00022	7,7551	0,13553	0,027	550,56	469,42	47,90	36,57	6539	64,08	0,4755	135,37	198,86,93	0,25	198,86,93	0,25
	6	37	36,4	7,8167	1324,96	284,53	0,00032	7,7753	0,13570	0,032	569,37	483,70	49,36	36,49	8084	79,22	0,4913	162,02	246,60,51	0,31	246,60,51	0,31
	7	37	36,3	7,8333	1317,69	284,35	0,00045	7,7852	0,13588	0,037	585,88	496,47	50,66	36,40	9679	94,86	0,5055	188,52	296,15,67	0,37	296,15,67	0,37
	8	37	36,2	7,8500	1310,44	284,17	0,00059	7,7951	0,13605	0,043	600,64	508,05	51,84	36,32	11318	110,92	0,5186	214,88	347,36,28	0,44	347,36,28	0,44
	9	37	36,1	7,8667	1303,21	283,99	0,00075	7,8050	0,13622	0,048	614,01	518,64	52,92	36,24	12997	127,37	0,5307	241,11	400,09,89	0,51	400,09,89	0,51
	10	37	36,0	7,9000	1296,00	284,40	0,00019	7,8149	0,13639	0,053	626,27	528,43	53,92	36,16	14711	144,17	0,5421	267,19	454,26,63	0,58	454,26,63	0,58
	11	37	35,9	7,9167	1288,81	284,21	0,00029	7,8247	0,13657	0,059	637,59	537,52	54,85	36,08	16458	161,29	0,5528	293,13	509,78,47	0,65	509,78,47	0,65
	12	37	35,8	7,9333	1281,64	284,01	0,00040	7,8346	0,13674	0,064	648,13	546,03	55,72	35,99	18235	178,70	0,5629	318,94	566,58,79	0,72	566,58,79	0,72
	13	37	35,7	7,9667	1274,49	284,41	0,00004	7,8445	0,13691	0,069	657,99	554,03	56,53	35,91	20040	196,39	0,5726	344,61	624,62,03	0,79	624,62,03	0,79
	14	37	35,6	7,9833	1267,36	284,21	0,00009	7,8544	0,13709	0,074	667,27	561,58	57,30	35,83	21871	214,33	0,5818	370,14	683,83,44	0,87	683,83,44	0,87
	15	37	35,5	8,0000	1260,25	284,00	0,00016	7,8643	0,13726	0,079	676,04	568,73	58,03	35,76	23726	232,52	0,5907	395,53	744,18,98	0,94	744,18,98	0,94
	16	37	35,4	8,0333	1253,16	284,38	0,00000	7,8742	0,13743	0,085	684,36	575,53	58,73	35,68	25605	250,93	0,5992	420,78	805,65,13	1,02	805,65,13	1,02
	17	37	35,3	8,0500	1246,09	284,17	0,00001	7,8841	0,13760	0,090	692,27	582,02	59,39	35,60	27505	269,55	0,6074	445,90	868,18,82	1,10	868,18,82	1,10
	18	37	35,2	8,0667	1239,04	283,95	0,00003	7,8940	0,13778	0,095	699,81	588,22	60,02	35,52	29426	288,38	0,6153	470,89	931,77,37	1,18	931,77,37	1,18
	19	37	35,1	8,1000	1232,01	284,31	0,00007	7,9039	0,13795	0,100	707,03	594,16	60,63	35,44	31367	307,39	0,6231	495,74	996,38,41	1,26	996,38,41	1,26
	20	37	35,0	8,1167	1225,00	284,08	0,00002	7,9138	0,13812	0,105	713,95	599,86	61,21	35,37	33326	326,60	0,6305	520,45	1061,99,84	1,34	1061,99,84	1,34
	21	37	34,9	8,1333	1218,01	283,85	0,00000	7,9237	0,13829	0,110	720,59	605,35	61,77	35,29	35303	345,97	0,6378	545,03	1128,59,81	1,43	1128,59,81	1,43
	22	37	34,8	8,1667	1211,04	284,20	0,00024	7,9336	0,13847	0,115	726,99	610,64	62,31	35,21	37297	365,51	0,6449	569,48	1196,16,67	1,51	1196,16,67	1,51
	23	37	34,7	8,1833	1204,09	283,96	0,00015	7,9435	0,13864	0,120	733,15	615,75	62,83	35,14	39307	385,21	0,6519	593,79	1264,68,96	1,60	1264,68,96	1,60
	24	37	34,6	8,2167	1197,16	284,30	0,00067	7,9534	0,13881	0,126	739,10	620,68	63,33	35,06	41333	405,07	0,6587	617,97	1334,15,36	1,69	1334,15,36	1,69
	25	37	34,5	8,2333	1190,25	284,05	0,00051	7,9633	0,13899	0,131	744,85	625,45	63,82	34,99	43374	425,07	0,6653	642,02	1404,54,72	1,78	1404,54,72	1,78
	26	37	34,4	8,2667	1183,36	284,37	0,00031	7,9732	0,13916	0,136	750,41	630,08	64,29	34,92	45430	445,21	0,6718	665,93	1475,86,01	1,87	1475,86,01	1,87
	27	37	34,3	8,2833	1176,49	284,12	0,00109	7,9831	0,13933	0,141	755,81	634,57	64,75	34,84	47499	465,49	0,6782	689,72	1548,08,30	1,96	1548,08,30	1,96
	28	37	34,2	8,3000	1169,64	283,86	0,00072	7,9930	0,13950	0,146	761,04	638,93	65,20	34,77	49582	485,90	0,6845	713,38	1621,20,80	2,05	1621,20,80	2,05
	29	37	34,1	8,3167	1162,81	283,60	0,00090	8,0029	0,13968	0,151	766,12	643,17	65,63	34,70	51678	506,44	0,6906	736,90	1695,22,78	2,15	1695,22,78	2,15
	30	37	34,0	8,3500	1156,00	283,90	0,00163	8,0128	0,13985	0,156	771,06	647,30	66,05	34,63	53786	527,10	0,6967	760,29	1770,13,63	2,24	1770,13,63	2,24
	31	37	33,9	8,3667	1149,21	283,63	0,00139	8,0226	0,14002	0,161	775,86	651,32	66,46	34,55	55907	547,89	0,7027	785,56	1845,92,81	2,34	1845,92,81	2,34
	32	37	33,8	8,3833	1142,44	283,36	0,00116	8,0325	0,14019	0,165	780,54	655,23	66,86	34,48	58039	568,78	0,7086	806,70	1922,59,86	2,43	1922,59,86	2,43
	33	37	33,7	8,4000	1135,69	283,08	0,00096	8,0424	0,14037	0,170	785,10	659,05	67,25	34,41	60183	589,79	0,7144	829,71	2000,14,38	2,53	2000,14,38	2,53
	34	37	33,6	8,4167	1128,96	282,80	0,00078	8,0523	0,14054	0,175	789,54	662,78	67,63	34,34	62338	610,91	0,7201	852,59	2078,56,05	2,63	2078,56,05	2,63
	35	37	33,5	8,4333	1122,25	282,52	0,00061	8,0622	0,14071	0,180	793,88	666,42	68,00	34,27	64504	632,14	0,7258	875,34	2157,84,62	2,73	2157,84,62	2,73

36	37	33.4	8.4500	1115.56	282.23	8.4283	0.00047	8.0721	0.14089	0.185	798.11	669.98	58.37	34.20	66680	653.47	0.7314	897.97	223799.88	2.83	
37	37	33.3	8.4667	1108.89	281.94	8.4481	0.00034	8.0820	0.14106	0.190	802.25	673.46	68.72	34.13	68867	674.90	0.7369	920.47	231901.69	2.94	
38	37	33.2	8.5000	1102.24	282.20	8.4679	0.00103	8.0919	0.14123	0.195	806.30	676.87	69.07	34.06	71064	696.42	0.7424	942.84	240089.95	3.04	
39	37	33.1	8.5167	1095.61	281.90	8.4877	0.00084	8.1018	0.14140	0.200	810.25	680.20	69.41	34.00	73270	718.05	0.7478	965.09	248364.64	3.14	
40	37	33.0	8.5333	1089.00	281.60	8.5075	0.00067	8.1117	0.14158	0.205	814.12	683.47	70.07	33.86	77711	761.57	0.7584	1009.22	265169.78	3.25	
41	37	32.9	8.5500	1082.41	281.30	8.5273	0.00052	8.1216	0.14175	0.209	817.52	686.66	70.38	33.79	79941	783.42	0.7637	1031.09	273685.65	3.46	
42	37	32.8	8.5667	1075.84	280.99	8.5471	0.00038	8.1315	0.14192	0.214	819.64	689.75	70.69	33.73	82175	805.32	0.7688	1052.84	282273.99	3.57	
43	37	32.7	8.5833	1069.29	280.67	8.5669	0.00027	8.1414	0.14209	0.219	821.75	692.75	70.99	33.66	84415	827.26	0.7739	1074.47	290935.45	3.68	
44	37	32.6	8.6000	1062.76	280.36	8.5867	0.00018	8.1513	0.14227	0.224	823.85	695.67	71.28	33.60	86659	849.26	0.7789	1095.98	299670.70	3.79	
45	37	32.5	8.6167	1056.25	280.04	8.6065	0.00011	8.1612	0.14244	0.228	825.95	698.50	71.56	33.53	88909	871.31	0.7838	1117.36	308480.43	3.91	
46	37	32.4	8.6333	1049.76	279.72	8.6262	0.00005	8.1711	0.14261	0.233	828.04	701.25	71.83	33.47	91163	893.40	0.7887	1138.62	317365.36	4.02	
47	37	32.3	8.6500	1043.29	279.39	8.6460	0.00002	8.1810	0.14278	0.238	830.12	703.94	72.10	33.40	93423	915.54	0.7935	1159.76	326336.24	4.13	
48	37	32.2	8.6667	1036.84	279.07	8.6658	0.00000	8.1909	0.14296	0.243	832.20	706.56	72.36	33.34	95688	937.74	0.7983	1180.78	335363.83	4.25	
49	37	32.1	8.6833	1030.41	278.73	8.6856	0.00001	8.2008	0.14313	0.247	834.27	709.11	72.61	33.27	97958	959.98	0.8030	1201.68	344478.93	4.36	
50	37	32.0	8.7000	1024.00	278.40	8.7054	0.00003	8.2107	0.14330	0.252	836.34	711.61	72.86	33.21	100233	982.28	0.8077	1222.46	353672.35	4.48	
51	37	31.9	8.7167	1017.61	278.06	8.7252	0.00007	8.2205	0.14348	0.257	838.39	714.04	73.11	33.15	102513	1004.63	0.8124	1243.12	362944.93	4.60	
52	37	31.8	8.7333	1011.24	277.72	8.7450	0.00014	8.2304	0.14365	0.261	840.45	716.43	73.34	33.09	104799	1027.03	0.8170	1263.66	372927.55	4.71	
53	37	31.7	8.7500	1004.89	277.37	8.7648	0.00022	8.2403	0.14382	0.266	842.49	718.76	73.58	33.02	107090	1049.48	0.8216	1284.08	381731.09	4.83	
54	37	31.6	8.7667	998.56	277.03	8.7846	0.00032	8.2502	0.14399	0.271	844.53	721.05	73.81	32.96	109386	1071.99	0.8261	1304.39	391246.46	4.95	
55	37	31.5	8.7749	992.25	276.41	8.8044	0.00087	8.2601	0.14417	0.275	846.56	723.29	74.03	32.90	111689	1094.55	0.8307	1324.57	400844.63	5.07	
56	37	31.4	8.7833	985.96	275.80	8.8241	0.00167	8.2700	0.14434	0.280	848.59	725.49	74.25	32.84	113996	1117.16	0.8352	1344.64	410526.55	5.20	
57	37	31.3	8.8000	979.69	275.44	8.8439	0.00193	8.2799	0.14451	0.284	850.61	727.65	74.47	32.78	116310	1139.84	0.8397	1364.59	420293.22	5.32	
58	37	31.2	8.8167	973.44	275.08	8.8637	0.00221	8.2898	0.14468	0.289	852.62	729.77	74.68	32.72	118629	1162.56	0.8442	1384.42	430145.68	5.45	
59	37	31.1	8.8333	967.21	274.72	8.8835	0.00252	8.2997	0.14486	0.293	854.63	731.85	74.89	32.66	120954	1185.35	0.8487	1404.14	440084.96	5.57	
60	37	31.0	8.8500	961.00	274.35	8.9033	0.00284	8.3096	0.14503	0.298	856.63	733.89	74.89	32.66							
1830	2257	2074	506.89	70705.10	17196.90	506.89	0.03601	488.78	8.53078												
Исковые коэффициенты																					$k_0 = 15,0382$ $k_1 = -0.1979$

	Конечная																				
	Номер шага, l	Начальный диаметр d_p , мм	Конечный диаметр d_k , мм	Угол заходного конуса α в конечной точке l -ого шага, град., дес.	d_{II}^2	$d_{II}^3 \cdot \alpha$	$\alpha_{расч} l^2$	Угол заходного конуса $\alpha_{ш} l$ град.	Угол заходного конуса $\alpha_{ш} l$ рад	Относительная степень деформации ϵ_l на l -ом шаге	Предельная деформация в конечной точке l -ого шага $\alpha_{расч} l$, МПа	Предельная деформация на l -ом шаге $\alpha_{ш} l$, МПа	материала на l -ом шаге $\alpha_{ш} l$, кгс	Диаметр нейтральной поверхности на l -ом шаге d_{np} , мм	Усилие обжатия $P_{ж}$, кгс	Усилие обжатия $P_{ж}$, кН	Среднее удельное усилие $P_{жл}$, кН	Площадь проекции очка деформации $F_{ш}$, мм ²	Полная работа формоизменения $A_{ш}$, кН · мм	Мощность обжатия на l -ом шаге N_p , кВт	
	1	36,9	31,0	7,7167	1361,61	284,75	7,7378	0,00044	8,3207	0,14522	0,294	854,63	740,21	75,53	32,62	119308	1169,22	0,8537	1376,87	433191,33	5,48
	2	36,8	31,0	7,7333	1354,24	284,59	7,7575	0,00059	8,3306	0,14540	0,290	852,62	745,74	75,53	32,58	116669	1143,35	0,8515	1349,93	422702,70	5,35
	3	36,7	31,0	7,7500	1346,89	284,43	7,7773	0,00074	8,3404	0,14557	0,287	850,61	750,55	76,10	32,54	114907	1126,09	0,8556	1323,12	415426,32	5,26
	4	36,6	31,0	7,7667	1339,56	284,26	7,7970	0,00092	8,3503	0,14574	0,283	848,59	754,91	76,59	32,50	114907	1107,64	0,8589	1296,45	407736,53	5,16
	5	36,5	31,0	7,8000	1332,25	284,70	7,8168	0,00028	8,3602	0,14591	0,279	846,56	758,95	77,03	32,46	111068	1088,47	0,8617	1269,90	399809,89	5,06
	6	36,4	31,0	7,8167	1324,96	284,53	7,8366	0,00039	8,3701	0,14609	0,275	844,53	762,74	77,44	32,42	109060	1068,79	0,8641	1243,49	391728,20	4,96
	7	36,3	31,0	7,8333	1317,69	284,35	7,8563	0,00053	8,3800	0,14626	0,271	842,49	766,32	77,83	32,38	107015	1048,74	0,8662	1217,21	383540,13	4,86
	8	36,2	31,0	7,8500	1310,44	284,17	7,8761	0,00068	8,3898	0,14643	0,267	840,45	769,73	78,20	32,34	104940	1028,41	0,8681	1191,06	375278,39	4,75
	9	36,1	31,0	7,8667	1303,21	283,99	7,8958	0,00085	8,3997	0,14660	0,263	838,39	772,98	78,54	32,30	102843	1007,86	0,8698	1165,04	366966,71	4,65
	10	36	31,0	7,9000	1296,00	284,40	7,9156	0,00024	8,4096	0,14678	0,258	836,34	776,10	78,88	32,26	100728	987,13	0,8713	1139,15	358623,13	4,54
	11	35,9	31,0	7,9167	1288,81	284,21	7,9354	0,00035	8,4195	0,14695	0,254	834,27	779,09	79,19	32,23	98599	966,27	0,8726	1113,39	350261,87	4,43
	12	35,8	31,0	7,9333	1281,64	284,01	7,9551	0,00048	8,4294	0,14712	0,250	832,20	781,98	79,50	32,19	96459	945,30	0,8738	1087,76	341894,46	4,33
	13	35,7	31,0	7,9667	1274,49	284,41	7,9749	0,00007	8,4392	0,14729	0,246	830,12	784,77	79,79	32,15	94311	924,25	0,8748	1062,25	333530,41	4,22
	14	35,6	31,0	7,9833	1267,36	284,21	7,9946	0,00013	8,4491	0,14746	0,242	828,04	787,47	80,08	32,12	92157	903,14	0,8758	1036,87	325177,70	4,12
	15	35,5	31,0	8,0000	1260,25	284,00	8,0144	0,00021	8,4590	0,14764	0,237	825,95	790,08	80,35	32,08	89999	881,99	0,8766	1011,62	316843,14	4,01
	16	35,4	31,0	8,0333	1253,16	284,38	8,0342	0,00000	8,4689	0,14781	0,233	823,85	792,61	80,62	32,05	87838	860,81	0,8774	986,50	308532,56	3,91
	17	35,3	31,0	8,0500	1246,09	284,17	8,0539	0,00002	8,4788	0,14798	0,229	821,75	795,08	80,88	32,01	85676	839,62	0,8781	961,50	300251,03	3,80
	18	35,2	31,0	8,0667	1239,04	283,95	8,0737	0,00005	8,4886	0,14815	0,224	819,64	797,47	81,13	31,98	83514	818,44	0,8787	936,63	292002,97	3,70
	19	35,1	31,0	8,1000	1232,01	284,31	8,0934	0,00004	8,4985	0,14833	0,220	817,52	799,79	81,37	31,94	81353	797,26	0,8792	911,88	283792,28	3,59
	20	35	31,0	8,1167	1225,00	284,08	8,1132	0,00001	8,5084	0,14850	0,216	814,42	802,05	81,61	31,91	79194	776,11	0,8796	887,26	275622,39	3,49
	21	34,9	31,0	8,1333	1218,01	283,85	8,1330	0,00000	8,5183	0,14867	0,211	810,25	804,26	81,84	31,87	77039	754,98	0,8800	862,76	267496,37	3,39
	22	34,8	31,0	8,1667	1211,04	284,20	8,1527	0,00020	8,5282	0,14884	0,206	806,30	806,40	82,07	31,84	74887	733,89	0,8803	838,39	259416,92	3,28
	23	34,7	31,0	8,1833	1204,09	283,96	8,1725	0,00012	8,5380	0,14902	0,202	802,25	808,49	82,29	31,81	72739	712,84	0,8805	814,14	251386,50	3,18
	24	34,6	31,0	8,2167	1197,16	284,30	8,1922	0,00060	8,5479	0,14919	0,197	798,11	810,53	82,50	31,78	70597	691,85	0,8807	790,01	243407,28	3,08
	25	34,5	31,0	8,2333	1190,25	284,05	8,2120	0,00045	8,5578	0,14936	0,193	793,88	812,51	82,71	31,75	68460	670,91	0,8808	766,00	235481,23	2,98
	26	34,4	31,0	8,2667	1183,36	284,37	8,2318	0,00122	8,5677	0,14953	0,188	789,54	814,45	82,91	31,71	66329	650,02	0,8808	742,12	227610,12	2,88
	27	34,3	31,0	8,2833	1176,49	284,12	8,2515	0,00101	8,5776	0,14971	0,183	785,10	816,33	83,11	31,68	64205	629,21	0,8808	718,36	219795,56	2,78
	28	34,2	31,0	8,3000	1169,64	283,86	8,2713	0,00082	8,5874	0,14988	0,178	780,54	818,16	83,30	31,65	62088	608,46	0,8808	694,72	212038,98	2,68
	29	34,1	31,0	8,3167	1162,81	283,60	8,2910	0,00066	8,5973	0,15005	0,174	775,86	819,95	83,49	31,62	59979	587,79	0,8807	671,21	204341,71	2,59
	30	34	31,0	8,3500	1156,00	283,90	8,3108	0,00154	8,6072	0,15022	0,169	771,06	821,68	83,67	31,59	57877	567,19	0,8805	647,81	196704,94	2,49
	31	33,9	31,0	8,3667	1149,21	283,63	8,3306	0,00131	8,6171	0,15040	0,164	766,12	823,37	83,85	31,57	55783	546,68	0,8803	624,53	189129,74	2,39
	32	33,8	31,0	8,3833	1142,44	283,36	8,3503	0,00109	8,6270	0,15057	0,159	761,04	825,01	84,02	31,54	53699	526,25	0,8801	601,38	181617,11	2,30
	33	33,7	31,0	8,4000	1135,69	283,08	8,3701	0,00090	8,6368	0,15074	0,154	755,81	826,60	84,18	31,51	51622	505,90	0,8798	578,34	174167,94	2,21
	34	33,6	31,0	8,4167	1128,96	282,80	8,3898	0,00072	8,6467	0,15091	0,149	750,41	828,13	84,35	31,48	49555	485,64	0,8794	555,42	166783,05	2,11
	35	33,5	31,0	8,4333	1122,25	282,52	8,4096	0,00056	8,6566	0,15109	0,144	744,85	829,62	84,50	31,46	47498	465,48	0,8790	532,62	159462,00	2,02
	36	33,4	31,0	8,4500	1115,56	282,23	8,4294	0,00043	8,6665	0,15126	0,139	739,10	831,05	84,65	31,43	45450	445,41	0,8785	509,94	152209,07	1,93
	37	33,3	31,0	8,4667	1108,89	281,94	8,4491	0,00031	8,6764	0,15143	0,133	733,15	832,42	84,80	31,40	43412	425,43	0,8780	487,37	145021,31	1,84

Конечная

38	33,2	31,0	8,5000	1102,24	282,20	8,4689	0,00097	8,6862	0,15160	0,128	726,99	833,73	84,94	31,38	41383	405,56	0,8774	464,93	137900,48	1,75
39	33,1	31,0	8,5167	1095,61	281,90	8,4886	0,00079	8,6961	0,15178	0,123	720,59	834,98	85,07	31,36	39365	385,78	0,8767	442,60	130847,14	1,66
40	33	31,0	8,5333	1089,00	281,60	8,5084	0,00062	8,7060	0,15195	0,118	713,95	836,16	85,20	31,33	37358	366,11	0,8760	420,39	123861,80	1,57
41	32,9	31,0	8,5500	1082,41	281,30	8,5282	0,00048	8,7159	0,15212	0,112	707,03	837,26	85,32	31,31	35361	346,54	0,8752	398,29	116944,93	1,48
42	32,8	31,0	8,5667	1075,84	280,99	8,5479	0,00035	8,7258	0,15229	0,107	699,81	838,30	85,43	31,29	33375	327,08	0,8743	376,31	110097,00	1,39
43	32,7	31,0	8,5833	1069,29	280,67	8,5677	0,00024	8,7356	0,15247	0,101	692,27	839,33	85,54	31,26	31401	307,73	0,8733	354,44	103320,96	1,31
44	32,6	31,0	8,6000	1062,76	280,36	8,5874	0,00016	8,7455	0,15264	0,096	684,36	840,37	85,65	31,24	29441	288,52	0,8723	332,69	96624,87	1,22
45	32,5	31,0	8,6167	1056,25	280,04	8,6072	0,00009	8,7554	0,15281	0,090	676,04	841,40	85,75	31,22	27496	269,46	0,8714	311,05	90008,26	1,14
46	32,4	31,0	8,6333	1049,76	279,72	8,6270	0,00004	8,7653	0,15298	0,085	667,27	842,43	85,86	31,20	25564	250,53	0,8704	289,53	83470,71	1,06
47	32,3	31,0	8,6500	1043,29	279,39	8,6467	0,00001	8,7752	0,15316	0,079	657,99	843,46	85,96	31,18	23647	231,74	0,8694	268,12	77011,77	0,98
48	32,2	31,0	8,6667	1036,84	279,07	8,6665	0,00000	8,7850	0,15333	0,073	648,13	844,49	86,07	31,16	21744	213,09	0,8684	246,83	70631,06	0,89
49	32,1	31,0	8,6833	1030,41	278,73	8,6862	0,00001	8,7949	0,15350	0,067	637,59	845,51	86,17	31,15	19855	194,58	0,8674	225,65	64328,16	0,81
50	32	31,0	8,7000	1024,00	278,40	8,7060	0,00004	8,8048	0,15367	0,062	626,27	846,53	86,28	31,13	17980	176,20	0,8664	204,58	58102,70	0,74
51	31,9	31,0	8,7167	1017,61	278,06	8,7258	0,00008	8,8147	0,15385	0,056	614,01	847,55	86,38	31,11	16119	157,96	0,8654	183,62	51954,31	0,66
52	31,8	31,0	8,7333	1011,24	277,72	8,7455	0,00015	8,8246	0,15402	0,050	600,64	848,57	86,48	31,10	14272	139,86	0,8644	162,78	45882,63	0,58
53	31,7	31,0	8,7500	1004,89	277,37	8,7653	0,00023	8,8344	0,15419	0,044	585,88	849,58	86,59	31,08	12439	121,90	0,8633	142,04	39887,31	0,50
54	31,6	31,0	8,7667	998,56	277,03	8,7850	0,00034	8,8443	0,15436	0,038	569,37	850,60	86,69	31,07	10620	104,07	0,8623	121,42	33968,00	0,43
55	31,5	31,0	8,7749	992,25	276,41	8,8048	0,00089	8,8542	0,15453	0,031	550,56	851,61	86,80	31,05	8815	86,38	0,8612	100,91	28124,36	0,36
56	31,4	31,0	8,7833	985,96	275,80	8,8246	0,00170	8,8641	0,15471	0,025	528,54	852,62	86,90	31,04	7024	68,83	0,8601	80,51	22356,01	0,28
57	31,3	31,0	8,8000	979,69	275,44	8,8443	0,00196	8,8740	0,15488	0,019	501,72	853,62	87,00	31,03	5247	51,42	0,8590	60,22	16662,56	0,21
58	31,2	31,0	8,8167	973,44	275,08	8,8641	0,00224	8,8838	0,15505	0,013	466,76	854,63	87,10	31,02	3484	34,14	0,8579	40,04	11043,52	0,14
59	31,1	31,0	8,8333	967,21	274,72	8,8838	0,00255	8,8937	0,15522	0,006	413,96	855,63	87,21	31,01	1735	17,00	0,8568	19,96	5498,56	0,07
60	31	31,0	8,8500	961,00	274,35	8,9036	0,00287	8,9036	0,15540	0,000	355,00	856,63	87,31	31,00	0	0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00
Сумма Σ	1830	2037	1860	499,1917	69336,1	16911,996	499,241	0,035771	516,7284	9,0186119										

Проверка (по конечной стадии)	Искомые коэффициенты	$k_0 = 15,0292$ $k_1 = -0,1976$
-------------------------------------	-------------------------	------------------------------------



Акционерное Общество
«Навлинский завод
«Промсвязь»

Россия, 242130, Брянская обл., пос. Навля,
ул. Комсомольская, 1
Телефон: (48342) 2-20-83
Тел/факс: (48342) 2-24-33
E-mail: promsvyaz1999@mail.ru
WWW. promsv32.ru

р/с 40702810308130100135
в Отделении № 8605 Сбербанка России г. Брянск
к/с 30101810400000000601
БИК 041501601
ИНН 3221002080 КПП 324501001
ОКПО – 01132784 ОКОНХ – 14971
ОКВЭД – 29.24.9 ОГРН - 1023202536411

21" ноября 2025г.

АКТ

о внедрении результатов диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Результаты диссертационной работы «Повышение эффективности технологии радиального обжата при получении заготовок в машиностроении», выполненной в ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» соискателем Низмеевым А.А. под руководством доктора технических наук, доцента Дорохова Д.О., прошли технологическую экспертизу и успешно опробованы в заготовительном производстве АО «Навлинский завод Промсвязь» и включены в общий технологический процесс производства заготовок валов в условиях единичного и серийного производства.

Результаты вышеуказанной работы приняты к внедрению с целью снижения энергозатрат технологических процессов заготовительного производства.

Настоящий акт составлен комиссией в составе:

Зам. тех. директора по основному производству

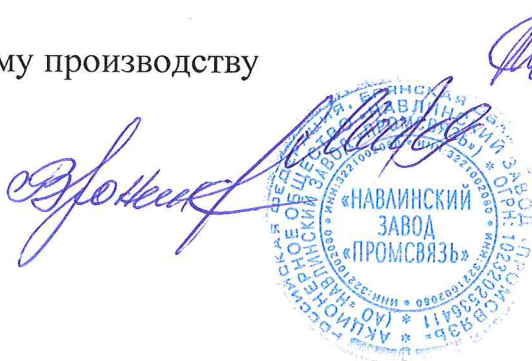
Главный технолог

Технический директор

Алешин И.Н.

Мартынов Д.С.

Воронин В.В.



НЛ-04

Лист, примеч.

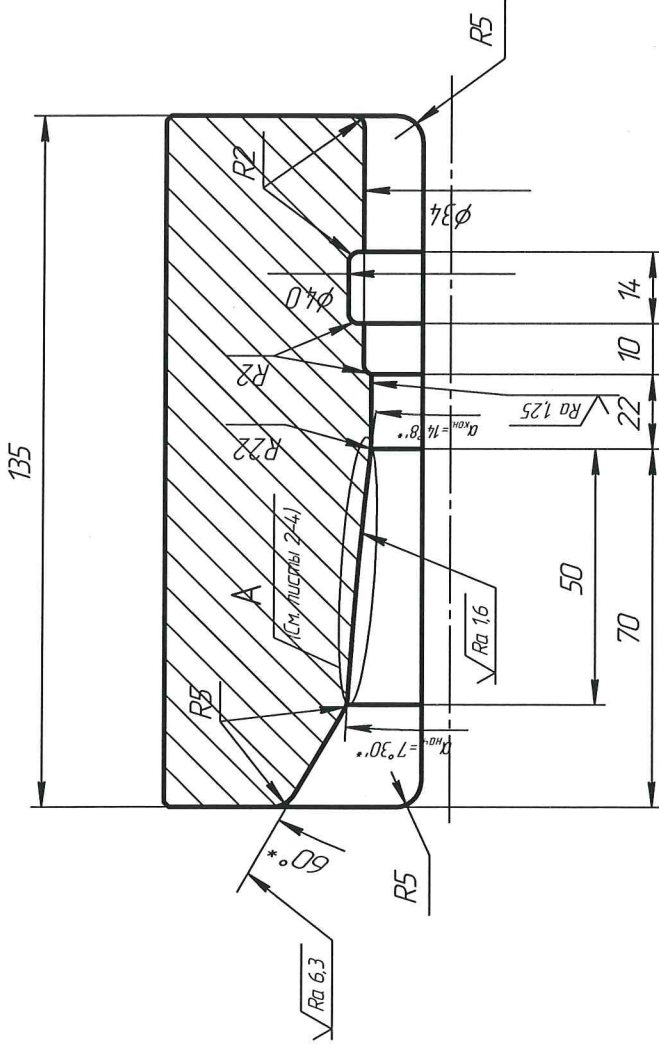
Лист, №

Лист, в дата

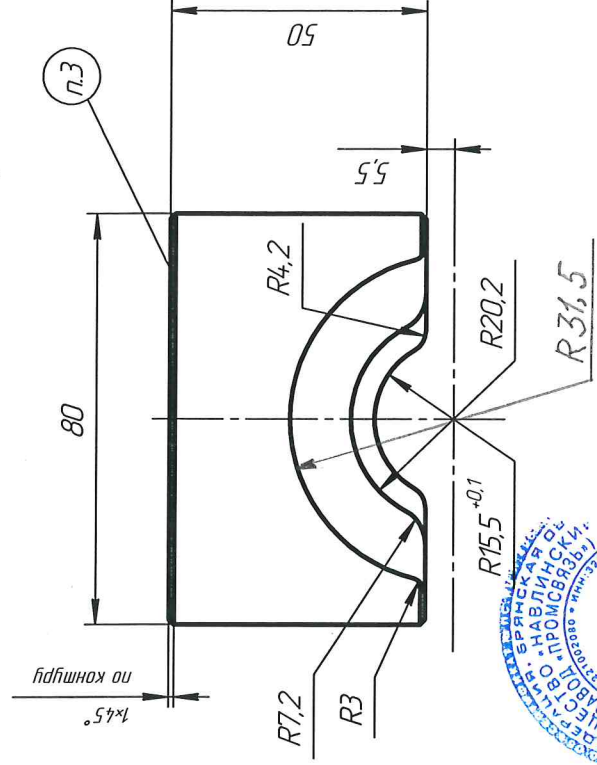
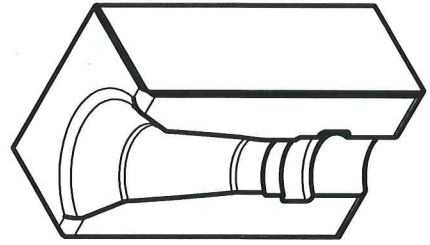
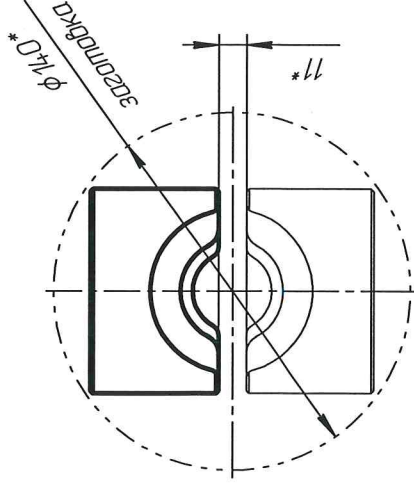
Лист, № докум.

Взам. инв. №

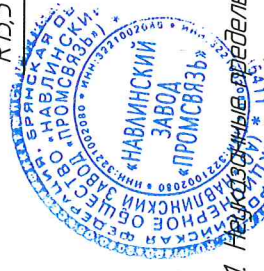
Лист, в дата



Изготовление комплекта деталей (1:2)



ГОДЕН ДЛЯ
ПРОИЗВОДСТВА
2025.11.14



1. Изготовить по чертежу детали с отклонениями размеров: Н14, н14, ± 0.2.
2. НРЛ 53.160
3. * Размеры для справок
4. Маркировать: φ37 – φ31, α=7°30'...14°8', гиперболический профиль.
5. Обработку профиля ручья выполнить в цельной заготовке с последующей разрезкой.
6. Допускается изготовление из сталей 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХГС, 5ХВТ, 5ХНВ, 5ХГСВФ, 5ХЗГС, 7ХЗ, 3Х2В8, 5ХВ2С, Х12Ф1, ХВ5 ГОСТ 5950-2000.

Изм./Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Низмеев А.А.	Низмеев А.А.	2025.11.14
Проб.	Алешин И.И.	Алешин И.И.	2025.11.14
Т.контр.	Мартынов Д.С.	Мартынов Д.С.	2025.11.14
Н.контр.	Ерохин Д.А.	Ерохин Д.А.	2025.11.14
Утв.	Ворожнич В.В.	Ворожнич В.В.	2025.11.14

Р0-1Н			
Баек			
радиально-обжимной гиперболический φ37...φ31			
Лист	Масса	Листов	Масштаб
1	3,8	1	1:1
Лист	Масса	Листов	Масштаб
1	3,8	1	1:1
В1-140 ГОСТ 2590-2006			
5ХНВ ГОСТ 14.35-74			
Круг			
АО "Промсвязь"			

Копировать

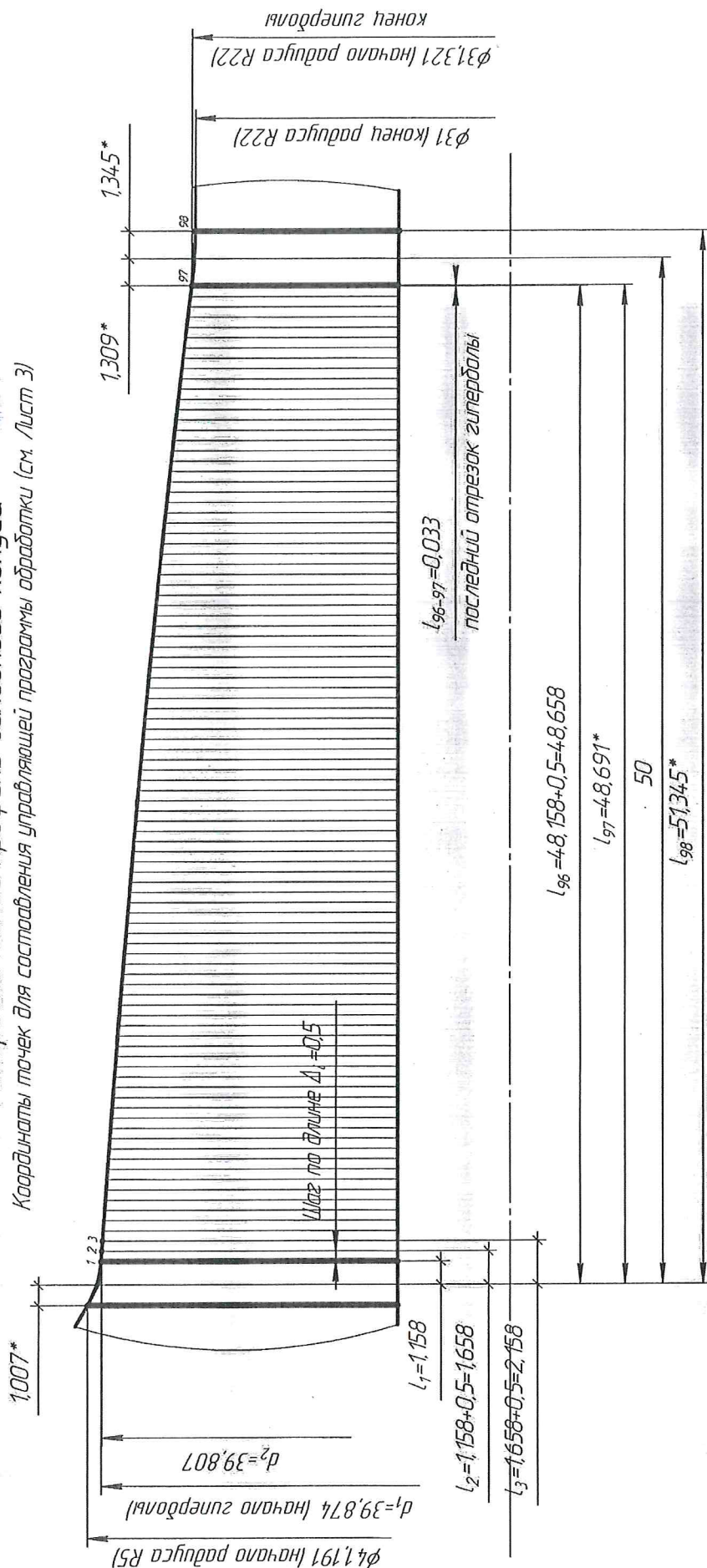
Формат А3



2025r

Гиперболический профиль заходного конуса

Координаты точек для составляющей управляющей программы обработки (см. Лист 3)



Инд. № подл.	Лист, и дата	Взам. инд. №	Инд. № дубл.	Лист, и дата
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

[illegible]

Копировать

Формат А3

PO-1H

НЛ-0Д

ГОДЕН ДЛЯ
ПРОИЗВОДСТВА
2025г



№ точки	Координаты, мм		№ точки	Координаты, мм		№ точки	Координаты, мм	
	По длине L	По диаметру d		По длине L	По диаметру d		По длине L	По диаметру d
1	1,158	39,874	34	17,658	37,442	67	34,158	34,504
2	1,658	39,807	35	18,158	37,361	68	34,658	34,405
3	2,158	39,739	36	18,658	37,28	69	35,158	34,305
4	2,658	39,671	37	19,158	37,198	70	35,658	34,205
5	3,158	39,603	38	19,658	37,116	71	36,158	34,104
6	3,658	39,534	39	20,158	37,034	72	36,658	34,002
7	4,158	39,464	40	20,658	36,951	73	37,158	33,899
8	4,658	39,394	41	21,158	36,867	74	37,658	33,796
9	5,158	39,324	42	21,658	36,783	75	38,158	33,692
10	5,658	39,254	43	22,158	36,699	76	38,658	33,588
11	6,158	39,183	44	22,658	36,614	77	39,158	33,482
12	6,658	39,111	45	23,158	36,528	78	39,658	33,376
13	7,158	39,039	46	23,658	36,442	79	40,158	33,269
14	7,658	38,967	47	24,158	36,356	80	40,658	33,162
15	8,158	38,895	48	24,658	36,268	81	41,158	33,053
16	8,658	38,822	49	25,158	36,181	82	41,658	32,944
17	9,158	38,748	50	25,658	36,093	83	42,158	32,834
18	9,658	38,675	51	26,158	36,004	84	42,658	32,723
19	10,158	38,601	52	26,658	35,915	85	43,158	32,612
20	10,658	38,526	53	27,158	35,825	86	43,658	32,5
21	11,158	38,451	54	27,658	35,734	87	44,158	32,386
22	11,658	38,376	55	28,158	35,643	88	44,658	32,272
23	12,158	38,3	56	28,658	35,552	89	45,158	32,158
24	12,658	38,224	57	29,158	35,46	90	45,658	32,042
25	13,158	38,148	58	29,658	35,367	91	46,158	31,925
26	13,658	38,071	59	30,158	35,273	92	46,658	31,808
27	14,158	37,994	60	30,658	35,179	93	47,158	31,69
28	14,658	37,916	61	31,158	35,085	94	47,658	31,57
29	15,158	37,838	62	31,658	34,99	95	48,158	31,45
30	15,658	37,76	63	32,158	34,894	96	48,658	31,329
31	16,158	37,681	64	32,658	34,797	97	48,691	31,321
32	16,658	37,602	65	33,158	34,7	98	51,345	31
33	17,158	37,522	66	33,658	34,602			

PO-1H

Лист
3

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

Копировал

Формат А4

Инд. № подл. Подп. и дата Взам. инд. № Инд. № дубл. Подп. и дата

PO-1H

Абсолютное обжатие $\Delta d = 37 - 31 = 6$ мм
Шаг по диаметру $h = 0,1$ мм



№ п/п	Имя	Подпись	Дата	Подпись	4
ПО-1H					

Հոսքեր	Փողոց	43
--------	-------	----

Формиат АЗ