

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Сибирский государственный  
индустриальный университет»



На правах рукописи

**ВАХРОЛОМЕЕВ ВЛАДИМИР АНАТОЛЬЕВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ – РАЗДЕЛЕНИЯ АРМАТУРНЫХ  
ПРОФИЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ  
ЗАТРАТ**

Специальность

2.6.4. – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент

Фастыковский Андрей Ростиславович

Новокузнецк – 2025

## Содержание

Общая характеристика диссертационной работы.....	4
1. Состояние вопроса постановка задач диссертационной работы.....	10
1.1 Анализ способов и технологий, используемых при прокатки – разделении арматурной стали.....	10
1.2 Теоретическое и экспериментальное изучение процесса прокатки – разделения.....	37
1.3 Цели и задачи диссертационной работы.....	43
2 Теоретические исследования процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного устройства.....	46
2.1 Оценка резерва сил трения в очаге деформации клетки, формирую- сочлененный профиль.....	46
2.2 Условия продольного разделения передавливанием и разрывом с использованием неприводного делительного устройства.....	53
2.3 Определение продольной устойчивости полосы при прокатке – раз- делении с использованием неприводного делительного устройства...59	
3. Изучение процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного устройства.....	62
3.1 Методика проведения экспериментов.....	62
3.1.1 Методика замера продольной силы, обеспеченной резервом сил трения в очаге деформации клетки, формирующей сочленен- ный профиль.....	62
3.1.2 Установка для определения усилия необходимого при продоль- ном разделении передавливанием и разрывом.....	67
3.2 Анализ экспериментальных и теоретических результатов исследования процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного устройства.....	71
3.2.1 Исследование продольной силы, обеспеченной резервом сил тре- ния при формировании сочлененного профиля.....	71
3.2.2 Изучение условий продольного разделения сочлененных	

профилей неприводным устройством.....	78
3.2.3 Изучение продольной устойчивости полосы в промежутке между клетью, формирующей сочлененный профиль и неприводным делительным устройством.....	85
4. Использование результатов исследований для совершенствования технологических режимов прокатки – разделения в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с целью снижения материальных затрат.....	93
Основные выводы и результаты диссертационной работы.....	110
Список литературы.....	112
Приложение А.....	127
Приложение Б.....	129

# **Общая характеристика диссертационной работы**

## **Актуальность темы исследования**

В настоящее время наметилась устойчивая тенденция развития строительного комплекса России. Современные технологии строительства основаны на использовании больших объемов металлоконструкций, что, в свою очередь, ставит перед металлургами задачи совершенствования существующих и разработку новых высокоэффективных технологий, направленных на увеличение выпуска сортового проката и в особенности арматурных профилей.

В процентном отношении арматурные профили составляют 55% от всего сортового проката, производимого в России. Основными поставщиками арматуры с весом погонного метра 6-8 кг являются мелкосортные станы.

Анализ известного опыта производства арматурных профилей небольшого сечения показал, что наиболее эффективной в плане снижения энерго- и материальных затрат, повышения производительности является технология прокатки-разделения в потоке прокатного стана. Суть такой технологии заключается в формировании в процессе прокатки сочлененного профиля с одновременным разделением в прокатной клетке или с последующим продольным разделением за клетку в неприводном устройстве.

Преимущества технологии прокатки-разделения в снижении энерго- и материальных затрат, повышении производительности вызывают повышенный интерес у производителей и необходимость дополнительного изучения, развития, совершенствования. Решению актуальной задачи исследования и совершенствования технологии прокатки-разделения посвящена данная работа.

## **Степень разработанности темы**

Проблемой практической реализации технологии прокатки-разделения занимались отечественные и зарубежные специалисты Клименко В.М., Губайдулин В.Ф., Шульгин Г.М., Жучков С.М., Matsuo G., Следнев В.П., Перунов Г.П., Wisselink H.H., Волков В.К. и др. Накоплен большой эксперимен-

тальный материал, однако не все вопросы остаются изученными, особенно это касается прокатки сочлененного профиля с последующим разделением в неприводном делительном устройстве. Данное направление технологии прокатки-разделения получило в последнее время широкое распространение при реконструкции действующих и проектировании новых мелкосортных станов, но отсутствие достаточного экспериментального материала, теоретической базы процесса существенно затрудняют практическое использование этой прогрессивной технологии. Требуют решения вопросы дальнейшего теоретического и экспериментального исследования технологии прокатки-разделения с использованием неприводного делительного устройства, разработки отсутствующих математических зависимостей, поиска новых технических и технологических решений, направленных на успешное использование данной прогрессивной технологии. Решение поставленных вопросов совершенствования технологии прокатки-разделения относят к актуальным задачам.

**Цель работы:** разработка научно-обоснованных предложений по выбору рациональных режимов формирования и разделения сочлененных профилей при прокатке-разделении с использованием неприводного делительного устройства, позволяющих снизить материальные затраты при получении арматурных профилей.

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

1. Разработать математические зависимости для определения величины продольной силы, обеспеченной резервом сил трения в очаге деформации клетки, формирующей сочлененные профили, наиболее часто используемые на практике. Проверить экспериментально достоверность полученных теоретических зависимостей и изучить факторы, влияющие на продольную силу.
2. Предложить теоретические зависимости для нахождения силы, необходимой при разделении сочлененных профилей передавливанием, разрывом, и оценить экспериментально достоверность полученных зависимостей, а также влияние различных факторов на изучаемые процессы разделения.

3. Изучить продольную устойчивость сочлененной полосы в промежутке между прокатной клетью и неприводным делительным устройством в процессе разделения. Оценить величину допустимого расстояния между клетью и неприводным делительным устройством, гарантирующего соблюдение продольной устойчивости.

4. Обобщить полученные теоретические и экспериментальные результаты в алгоритм для определения области осуществимости процесса прокатки – разделения с использованием неприводных делительных устройств, а также определения рациональных режимов формоизменения и разделения.

5. Сформулировать на основании проведенных исследований предложения по совершенствованию технологии прокатки – разделения арматурных профилей применительно к действующему производству. Применить результаты исследований в учебном процессе.

#### **Научная новизна**

- получены теоретические зависимости для определения продольной силы, обеспеченной резервом сил трения в очаге деформации клетки, формирующей сочлененный профиль, отличающиеся учетом формы калибров, величины деформации, условий трения на контакте полосы с валками, механических свойств разделяемого металла, числа сочлененных профилей.

- предложены теоретические зависимости для определения продольного усилия, необходимого при разделении сочлененных профилей способами передавливания и разрыва. Полученные теоретические зависимости проверены экспериментально и учитывают толщину соединительной перемычки, механические свойства материала, геометрию делительного инструмента.

- получены теоретические зависимости для определения допустимого расстояния между прокатной клетью, формирующей сочлененный профиль, и делительным устройством, гарантирующие устойчивость полосы в этом промежутке. Предложенные зависимости учитывают геометрические параметры и форму сочлененного профиля, продольное усилие, необходимое для разделения.

## **Практическая значимость работы**

- разработан алгоритм для определения области осуществимости процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного инструмента и поиска рациональных режимов формоизменения и разделения сочлененных полос при реализации технологии на действующем производстве.

- предложены зависимости, позволяющие оценить правильность компоновки оборудования в системе прокатная клеть – неприводное делительное устройство в условиях действующего производства.

- на основе полученных теоретических и экспериментальных данных разработаны рекомендации по совершенствованию режимов формоизменения и разделения сочлененных профилей для условий непрерывного мелко-сортного стана 250-1 АО ЕВРАЗ ЗСМК, позволившие снизить материальные затраты (ожидаемый экономический эффект, подтвержденный соответствующим актом 9,1 млн. рублей в год).

- результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс и используются в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» при подготовке бакалавров по направлению 22.03.02 «Металлургия» (подтверждено Справкой).

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Теоретические зависимости и экспериментальные данные для оценки величины продольной силы, обеспеченной резервом сил трения клетки, формирующей сочлененный профиль, учитывающие форму калибра, условия трения, параметры очага деформации, величину деформации, механические свойства.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований условий продольного разделения сочлененных профилей в неприводных делительных устройствах способами передавливания и разрыва.

3. Экспериментальные и теоретические результаты по оценке продольной устойчивости при разделении сочлененной полосы в промежутке между

клетью, формирующей сочлененный профиль и неприводным делительным устройством.

4. Разработанные на базе проведенных теоретических и экспериментальных исследований технические и технологические решения для совершенствования технологических режимов прокатки – разделения арматурных профилей с целью снижения материальных затрат.

**Методология и методы исследования:** При проведении исследований силовых параметров процесса продольного разделения применялся метод тензометрии со сбором и обработкой информации на персональном компьютере. Методы исследований базируются на основополагающих принципах обработки металлов давлением, а также положений физического и математического моделирования.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.6.4 - Обработка металлов давлением: пункт 1. «Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки давлением металлов, сплавов и композитов», пункт 8. «Исследование пластической деформации металлов в процессах обработки давлением, совмещенных с другими технологическими процессами обработки металлов с целью разработки энергоэффективных и материалосберегающих технологий».

**Объективность полученной информации обосновывается:** применением апробированного аппарата математического и физического моделирования, использованием положений теории обработки металлов давлением; качеством и точностью замеров изучаемых величин с последующим статистическим анализом результатов; объективным сравнением полученных результатов с материалами имеющимися в технической литературе; использованием проверенных методов изучения энергосиловых условий прокатки.

**Личный вклад:** проведение теоретических и экспериментальных исследований, изучение и анализ литературных источников, осуществление

экспериментов по изучению процесса прокатки-разделения, обработка и анализ данных, полученных при физических и числовых экспериментах, объяснение полученных зависимостей и закономерностей, обобщение материала диссертации в выводах и заключении.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации доложены на 6 конференциях различного уровня: XXII, XXIII Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество», СибГИУ, г. Новокузнецк, 2021, 2022 гг.; Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения», СибГИУ, г. Новокузнецк, 2022, 2023 гг.; XII Международная научно-практическая конференция «Современные тенденции развития науки и мирового общества в эпоху цифровизации», Москва, 2023 гг.; XIII Международная научно-практическая конференция «Актуальные научные исследования», Пенза, 2023 гг.

**Публикации:** Результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах, в том числе в 3 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов и приложений. Изложена на 129 страницах, содержит 60 рисунков, 6 таблиц, список использованных источников из 130 наименований.

# **1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

## **1.1. Анализ способов и технологий, используемых при прокатки-разделении арматурной стали**

Многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых классического процесса получения арматурных профилей в сравнении с процессом прокатки – разделения убедительно доказали преимущества последнего по следующим основным показателям [1–7]: увеличение производительности без значительных материальных затрат на реконструкцию, снижение материальных и энергетических затрат на производство при двухручье-вой прокатке – разделении 12% – 25%, при четырехручье-вой - до 30%, снижение расхода валков на 15% и 20%, расширение сортамента готовой продукции. [2, 7, 8].

Преимущества технологии прокатки – разделения при производстве арматурных профилей с массой погонного метра 6 – 8 кг способствовало активному ее внедрению в производство [2 – 11]. Основой развития данного процесса послужил накопленный объем исследовательских работ, результатов промышленных испытаний, в которых изучены разные способы разделения сочлененных профилей.

Прием продольного разделения сочлененных профилей применяется достаточно давно. С созданием прокатных станов у нас в стране по такой схеме получали проволоку. Продольное разделение заготовки на несколько частей осуществлялось за несколько этапов. Вначале отковывалась сочлененная заготовка, которая впоследствии окончательно формировалась в валках прокатной клетки и затем продольно разделялась. Причем вначале эта операция проводилась вручную. Позже разделение полосы на части стали осуществлять в специальной клетке острыми кромками реборд валков. Полученным после продольного разделения заготовкам придавалась окончательная форма волочением.

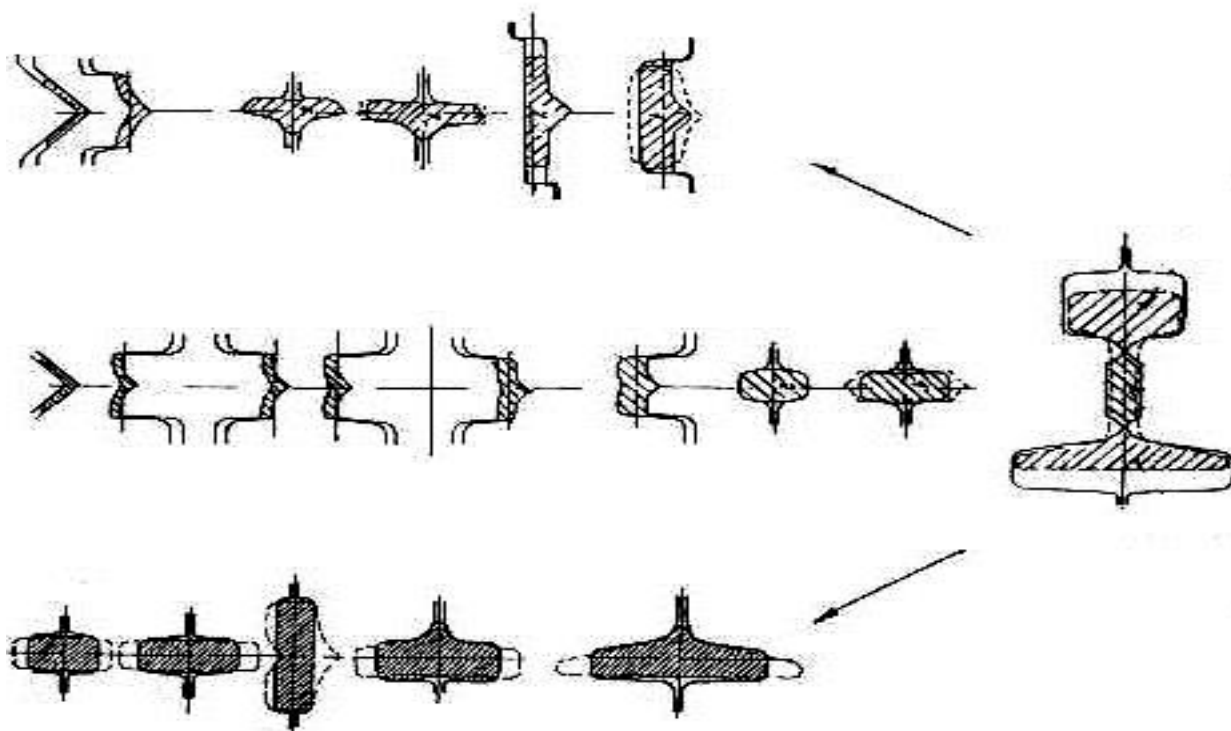


Рисунок 1.1 – Профили, получаемые после разделения отслуживших свой срок рельсов [13].

В 1868 г., В. Свитом была разработана технология и организовано производство по переработке вышедших из обращения железнодорожных рельсов. Предложенная технология переработки отслуживших свой срок железнодорожных рельсов заключалась в разделении их на три части (головка, подошва, шейка) с последующей прокаткой из них различных профилей. В качестве примера можно привести вариант разделки отработанного рельса и получения готовых изделий ( см. рисунок 1.1). Вопрос переработки выведенных из обращения рельсов до настоящего времени является актуальным ввиду высокой рентабельности (до 300%) [12]. Большой интерес данная проблема представляет и для нашей страны имеющей разветвленную сеть железных дорог. Особенности и перспективы использования отработанных железнодорожных рельсов в качестве заготовки подробно рассмотрены в работе Ю.Б. Бахтинова [13]. При всей своей привлекательности данный способ утилизации отработавших свой срок рельсов имеет один существенный недостаток, который ставит под сомнение эффективность такого технического реше-

ния. Этот недостаток заключается в том, что отработанные рельсы имеют массу внутренних и наружных дефектов в виде трещин, сколов и т.д. поэтому использование такого материала в качестве заготовок очень вероятно приведет к многочисленным дефектам и браку готовой продукции.

Отработанный процесс продольного разделения рельсов в дальнейшем нашел применение при получении квадратных заготовок из сляба, простых сортовых профилей из литых заготовок.

Особенностью процесса прокатки- разделения является уникальная возможность получения из одной заготовки несколько профилей. Для этой цели в специальных калибрах формируется сочлененный профиль, включающий от двух до пяти раскатов определенной формы, соединенных перемычкой, которая на заключительной стадии продольно разделяется в потоке стана. Полученные после разделения раскаты подвергаются дальнейшей прокатке на готовый профиль.

Как следует из литературных источников [14-15] реализация процесса прокатки – разделения может быть проведена в черновых, промежуточных и чистовых группах клетей мелкосортных и проволочных станов в зависимости от решаемых задач. Если требуется увеличение заготовки без увеличения производительности, то процесс разделения осуществляется в черновой или промежуточной группах. Использование продольного разделения в чистовой группе позволяет, не увеличивая сечения заготовки, уменьшить число рабочих клетей и увеличить производительность.

Рассмотренные варианты возможного разделения сочлененных профилей в черновой и промежуточной группах имеют общий недостаток, связанный с необходимостью остановки процесса прокатки во всех клетях при застревании раската в клетях одной из чистовых групп. Одним из путей решения данной проблемы на непрерывном мелкосортном стане является наличие дополнительной резервной группы клетей, которая позволит при аварийной ситуации оперативно принять металл [16]. Такое решение представляет интерес, однако, может

быть реализовано только на вновь строящихся прокатных станах при увеличении затрат на строительство.

Наиболее удачным из рассмотренных вариантов можно считать организацию продольного разделения в непосредственной близости от чистовых клетей. Такой подход в настоящее время используется на вновь проектируемых мелкосортных станах и при освоении процесса прокатки – разделения на действующем производстве. Привлекательность такого решения обусловлена преимуществами, заключающимися в уменьшении времени на перевалку валков, сокращении количества клетей, упрощении обслуживания оборудования, уменьшении потерь металла при аварийных ситуациях, снижении энергозатрат.

При реализации процесса прокатки – разделения наиболее сложным и ответственным этапом является продольное разделение сочлененного профиля в потоке стана. Успех продольного разделения во многом зависит от правильного выбора способа разделения.

К способам разделения предъявляются следующие требования [17]:

1. Высокое качество поверхности проката в местах разделения, не требующее дополнительной обработки;
2. Отсутствие отходов при разделении;
3. Гарантированное разделение по длине раската, обеспечивающее отсутствие дефектов и искажение профиля;
4. Разделение раската в потоке прокатного стана;
5. Возможность одновременного разделения более двух сочленений профилей;
6. Удобство и простота использования делительного устройства;
7. Минимальные трудовые и энергетические затраты при эксплуатации делительного устройства.

В настоящий момент используются следующие способы прокатки-разделения профилей:

- прокатка с последующим разделением перемычки разрывом или передавливанием;
- прокатка с последующим разделением сдвигом в одном направлении;
- прокатка с последующим разделением сдвигом в противоположных направлениях;
- прокатка сочлененного профиля с последующим разделением вне очага деформации различными способами;
- прокатка горячекатаных профилей в сдвоенном виде с последующим разделением в холодном состоянии.

В настоящее время известно большое количество вариаций способов продольного разделения применительно к разным условиям работы прокатных станов, особенностям сортамента, конфигурации сочлененных заготовок и т.д. Подробный обзор известных способов разделения сочлененных профилей рассмотрен в статьях [14, 18-20].

Одним из первых способов разделения, описанным В. Тринксом, является способ разделения полос в горячем состоянии двумя кольцевыми буртами, имеющими треугольную форму. Опытное опробование показало возможность такого разделения, однако его промышленное использование вскрыло ряд существенных недостатков: упругая деформация клетки приводила к тому, что полоса не разделялась на части, а при разгрузке гребни ударялись друг о друга, что приводило к быстрому их затуплению и разрушению. Острый конец гребня быстро нагревался, теряя прочность, а при охлаждении - быстро охлаждался. Такое термоциклирование приводило к появлению трещин и разрушению гребня. Таким образом, несмотря на свою простоту, способ оказался сложно осуществимым.

Однако, несмотря на недостатки способа разделения передавливанием, работы по совершенствованию этого способа продолжаются [21]. Авторы работы, используя исследования, проведенные в ИМЕТЕ им. А.А. Байкова, разработали процесс продольного разделения широкой полосы разрезающими ребордами в горячем состоянии на несколько узких полос. Для этой цели

использован калибр, выполненный с четырьмя клиновыми ребрами для разделения плоской полосы передавливанием (рисунок 1.2). Использование клетки с разрезными валками, по мнению авторов, позволит существенно расширить сортамент выпускаемой продукции. Реализация такой технологии требует особых условий подготовки боковых участков разделяемой полосы с целью исключения случаев переполнения или не заполнения ручья и неправильное формирование боковых граней порезанной заготовки. Для предотвращения переполнения или не заполнения ручья авторами статьи предлагается перед разделением широких полос подвергать их операции редуцирования.

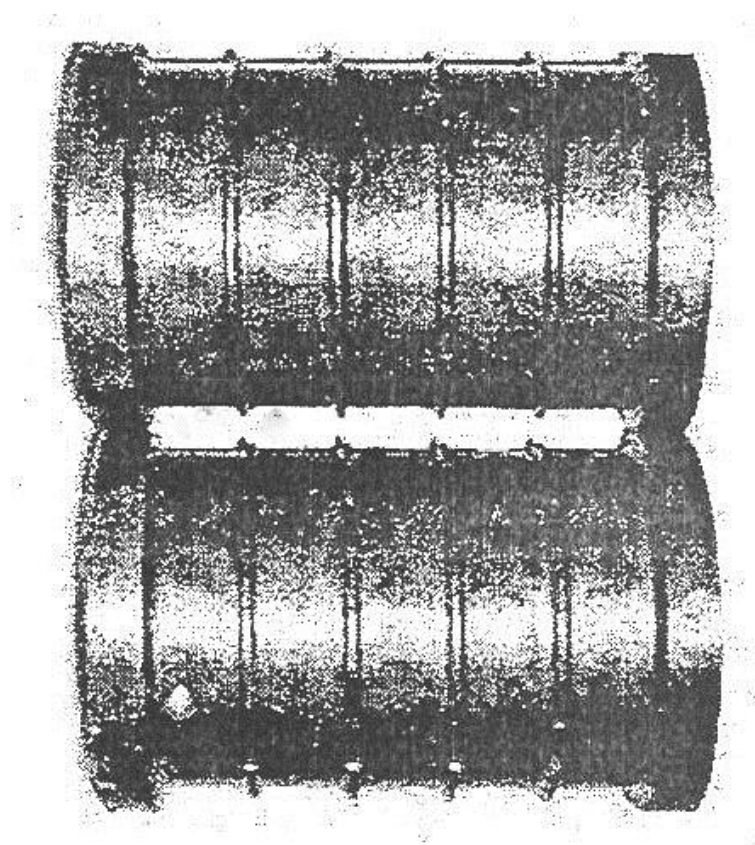


Рисунок 1.2 - Валки для продольного разделения передавливанием широких полос [21]

Некоторые зарубежные фирмы, такие как шотландское отделение "Бритиш", "Стил", японские фирмы "Син ниипон сэйтэцу", "Кавасаки сэйтэцу" и другие [22, 23] исследуют и разрабатывают технологию разделения

гребнями валка слябов на несколько заготовок по схеме, приведенной на рисунке 1.3.

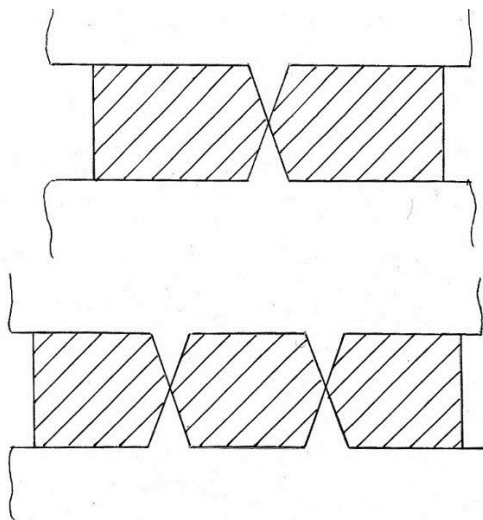
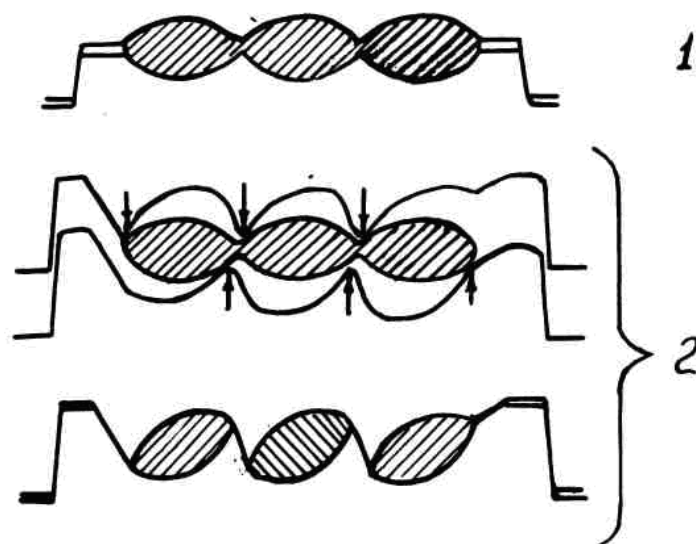


Рисунок 1.3 – Способ разделения полос в горячем состоянии двумя кольцевыми буртами треугольной формы.

Интересный вариант технологии прокатки-разделения, предусматривающий продольное разделение гребнями прокатных валков, предложен японской фирмой «Син ниппон сэйтэцу» [3, 4]. Предлагаемая технология предусматривает формирование сочлененного профиля, состоящего из нескольких овалов. Полученный сочлененный профиль попадает в прокатную клеть, на валках которой нарезаны калибры с разделяющими гребнями (рисунок 1.4). Вершины разделительных гребней верхнего и нижнего валка расположены со смещением. Благодаря такому расположению гребней и разному диаметру верхнего и нижнего валка создается крутящий момент, поворачивающий отдельные полосы сочлененного профиля вокруг продольной оси, отделяя их друг от друга.

При использовании такого способа разделения возникают растягивающие напряжения в области перемычки, создавая условия для образования заусенца в месте раздела. Наличие заусенца снижает качество готовой продукции и вызывает необходимость в увеличении числа пропусков для выкатывания заусенца.



1- калибр, формирующий сочлененный профиль из нескольких овалов; 2 – процесс разделения сочлененный овальных профилей

Рисунок 1.4 – Этапы формирования сочлененного профиля и последующего разделения гребнями калибра [3]

Рассмотренный способ ввиду его сложности реализации и плохого качества мест разделения не нашел применение в промышленных условиях.

Представляет определенный интерес разделение перемычки, соединяющей сочлененные профили срезом. Такой способ разделения обеспечивает хорошее качество металла в месте раздела, без характерного заусенца, благодаря действию сдвигающих напряжений.

В качестве примера рассмотрим использование данного способа разделения при производстве арматурной стали [24]. При производстве арматурной стали на начальном этапе формируется сочлененный профиль, состоящий из двух прямоугольных полос, связанных перемычкой. Сформированная сочлененная заготовка поступает в калибр, по мере заполнения которого происходит срез перемычки и интенсивное обжатие разделенных полос с формированием из них плоских овалов (рисунок 1.5). Полученные овальные полосы кантуются на  $90^0$  и задаются в чистовой калибр, где прокатываются в готовый профиль.

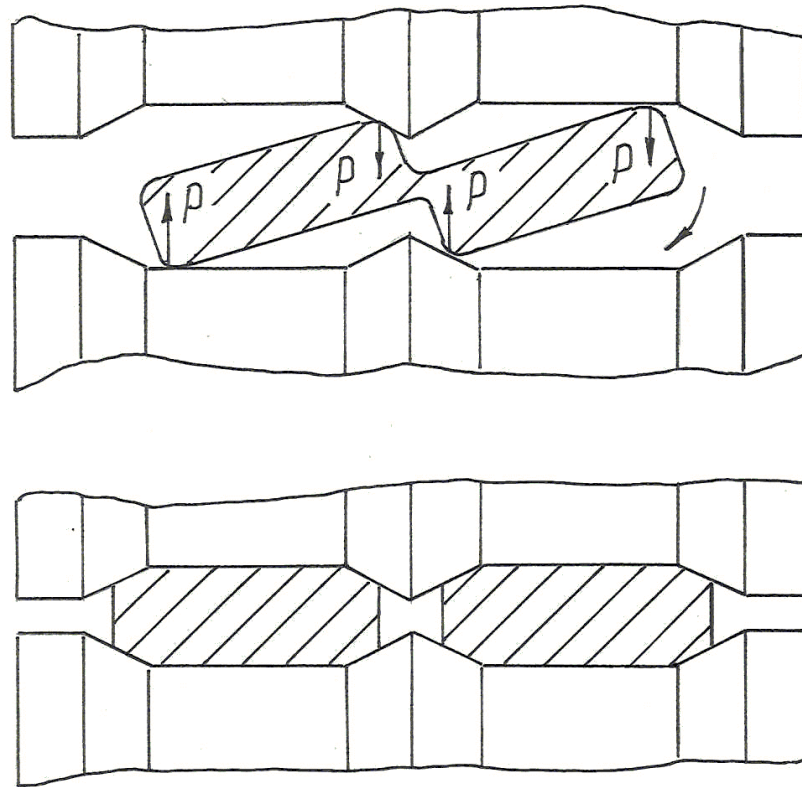


Рисунок 1.5 – Продольное разделение сочлененной полосы путем среза перемычки

Опыт использования разделения сочлененного профиля срезом при производстве арматурных профилей в условиях полунепрерывного стана 250 показал преимущества совмещения операций разделения сдвигающими напряжениями и интенсивным обжатием на качество металла в месте раздела (отсутствие заусенца). К положительным моментам также можно отнести увеличение часовой производительности и температуры конца прокатки на  $50^{\circ}\text{C}$  [25, 26]. Отмеченные преимущества позволяют увеличить производительность действующих производств, а также сэкономить энергоресурсы за счет снижения температуры нагрева заготовки.

Основным недостатком рассматриваемого способа является наличие осевых сил, что вызывает необходимость их учета и усложняет узел прокатного валка за счет использования конусов.

К еще одному варианту разделения путем сдвига в области перемычки можно отнести способ, рассмотренный в статье [27]. Как следует из приведенных материалов, в процессе прокатки формируется сочлененный профиль, состоящий из трех квадратных полос, расположенных в шахматном порядке и соединенных перемычками. В специальном калибре производится разнонаправленное смещение полос в направлении, перпендикулярном оси валков, что приводит к разрушению перемычек за счет возникновения сдвигающих напряжений. Проведенные исследования такого способа разделения выявили ряд недостатков, ограничивающих область применения способа. Значительные усилия, действующие при разделении на сочлененную полосу в направлении, перпендикулярном оси валков, приводят к искажению формы поперечного сечения сочлененных полос и вскрытию поверхностных дефектов. При проведении исследований выявляется повышенный износ валков и плохая проработка металла в области перемычек [27].

Оригинальный способ разделения сочлененного профиля предложен в работе [28]. Согласно описанию способа из прямоугольной полосы за два прохода при взаимном повороте отдельных частей заготовки вокруг их продольной оси формируется сочлененный профиль (рисунок 1.6). На заключительной стадии перемычка срезается выступом в средней части калибра. При разделении срезанный металл перемычки должен быть удален, что создает дополнительные сложности и увеличивает расходный коэффициент металла. В промышленных и лабораторных условиях данный способ не опробован и представляет интерес чисто в теоретическом плане.

Похожий принцип разрушения перемычки только скручиванием относительно своей продольной оси рассмотрен в работе [29]. Для этого разработана специальная калибровка, опробованная в условиях мелкосортно – проволочного стана 320/150 Белорусского металлургического завода при получении арматуры №10 – 14. Выбор арматуры обусловлен утяжкой в месте разделения и образованием заусенца.

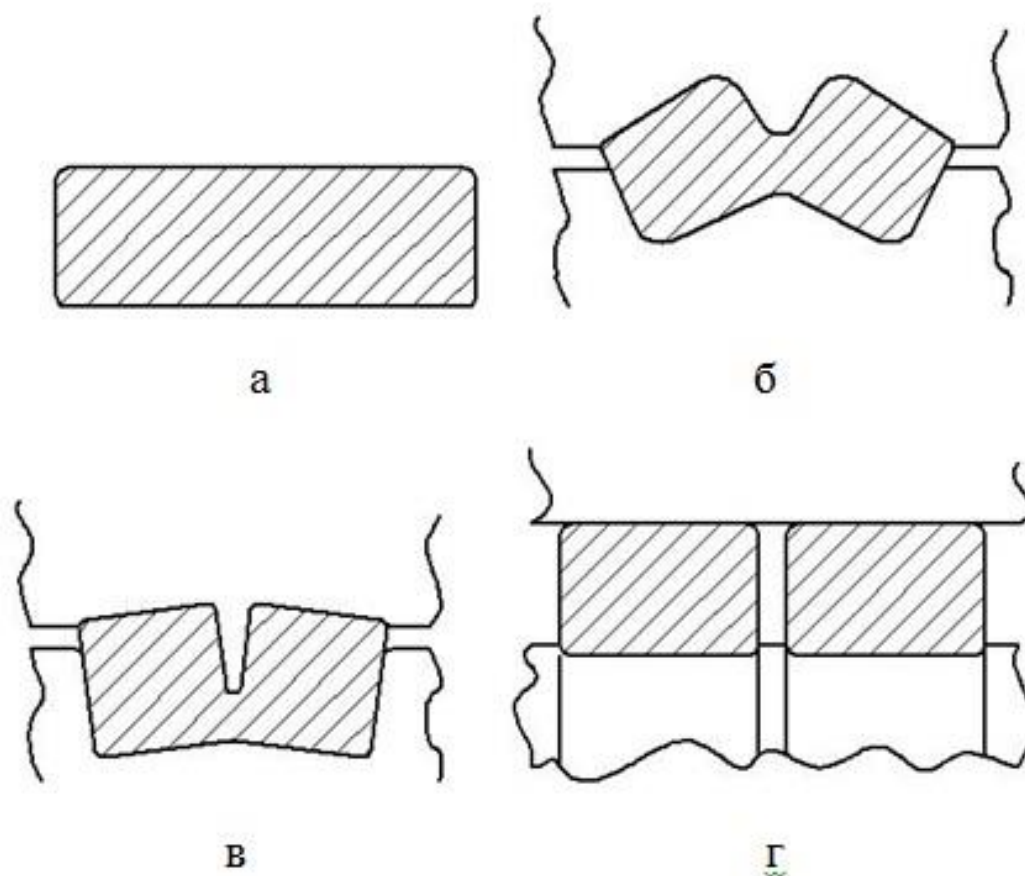


Рисунок 1.6 – Способ разрушения перемычки со взаимным поворотом формируемых заготовок [28]. а, б, в, г – стадии разделения.

Недостатки способа разделения поворотом со сдвигом, связанные со сложностью настройки оборудования, необходимостью контролирования положения металла при последующей задаче в калибр, осложнили применение данного приема на промышленных предприятиях.

Интересный способ продольного разделения строенного сочлененного профиля приведен в работах [30, 31]. Реализуется рассматриваемый способ продольного разделения следующим образом. Из исходной заготовки в вытяжных калибрах черновой и промежуточной групп формируется заготовка в виде плоского овала. Из этой заготовки в следующей клети получают полосу с намеченными местами разделения на три части (рисунок 1.7). Площадь поперечного сечения средней части больше площади поперечного сечения каждой из крайних частей. Деформация такой полосы в калибре следующей кле-

ти приводит к уменьшению соединительных перемычек и разному коэффициенту вытяжки центральной и крайних частей сочлененного профиля. Разные коэффициенты вытяжки центральной и крайних частей сочлененного профиля создают условия к возникновению больших продольных напряжений в перемычках, обеспечивающих их разделение.

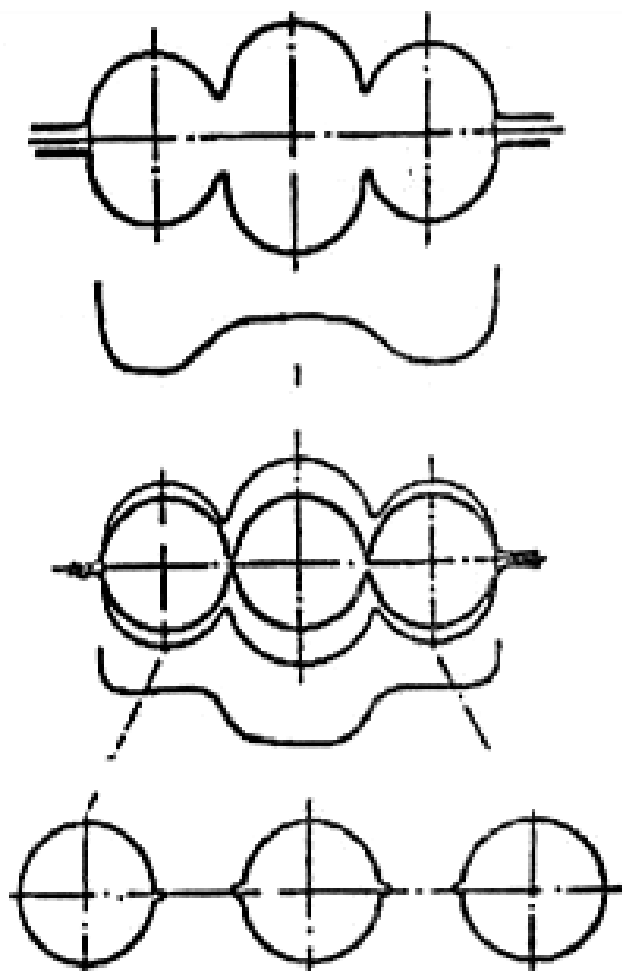


Рисунок 1.7 – Способ разделения за счет разной вытяжки между средней и крайними полосами [30]

Основной трудностью, связанной с возможностью реализации рассматриваемого способа, является правильный подбор коэффициентов вытяжки средней и крайних частей сочлененной заготовки с учетом условий деформирования, свойств материала заготовки. Ошибки при определении коэффициентов вытяжки приводят к искажению формы получаемых профилей и застреванию в валковой арматуре.

Практическая реализация рассмотренного способа возможна только на мелкосортно-проволочных станах, оборудованных блоками чистовых клетей, расположенных за чистовой группой сортовой линии. В таком случае одна из трех ниток может использоваться в качестве подката для проволочной линии, а две другие нитки прокатаны в арматуру.

Несколько иной подход использован при разделении горячего проката разрывом (рисунок 1.11). Разделение осуществляется внедрением клиновой части калибра в сочлененную заготовку. Это создает в перемычке растягивающие напряжения, приводящие к ее разрушению [14]. Таким образом реализуется технология прокатки – разделения на обжимных, заготовочных и сортовых станах. Предложена данная технология прокатки – разделения специалистами Донецкого национального технического университета (ДонНТУ), НПО «ДОНИКС» (Г.М. Шульгин, В.Ф. Губайдулин, В.М. Клименко, С.С. Тильга, В.А. Нечипоренко, С.П. Ефименко, А.Г. Маншилин, В.С. Солод, В.А. Шеремет и другие) и используется на металлургическом комбинате «Криво-рождсталь» (ОАО «Миттал Стил Кривой Рог») [14, 19, 32-37].

Способ разделения перемычки разрывом выполняется следующим образом. Из прямоугольной заготовки за четыре пропуска в двухручевом калибре формируется раскат, состоящий из двух заготовок ромбической формы, соединенных между собой по меньшей диагонали перемычкой толщиной 7 – 12 мм. Разделение раската осуществляется разрывом перемычки путем прокатки в калибре с увеличенным расстоянием между осями ручьев. Одновременно с разделением ромбических заготовок осуществляется формирование из них квадратных профилей. Стадии разделения сочлененной заготовки и формирования квадратных профилей показаны на рисунке 1.8. Первоначально при заполнении очага деформации происходит смятие вершин сочлененной ромбической заготовки. По мере заполнения очага деформации увеличивается нормальная сила  $N$ , при достижении критической величины начинается пластическая деформация металла в зоне перемычки и происходит ее растяжение вплоть до разрыва. После разрыва перемычки на заключительной стадии по-

лученные профили всесторонне обжимаются, что способствует выкатыванию мест раздела, улучшая качество поверхности готовой продукции.

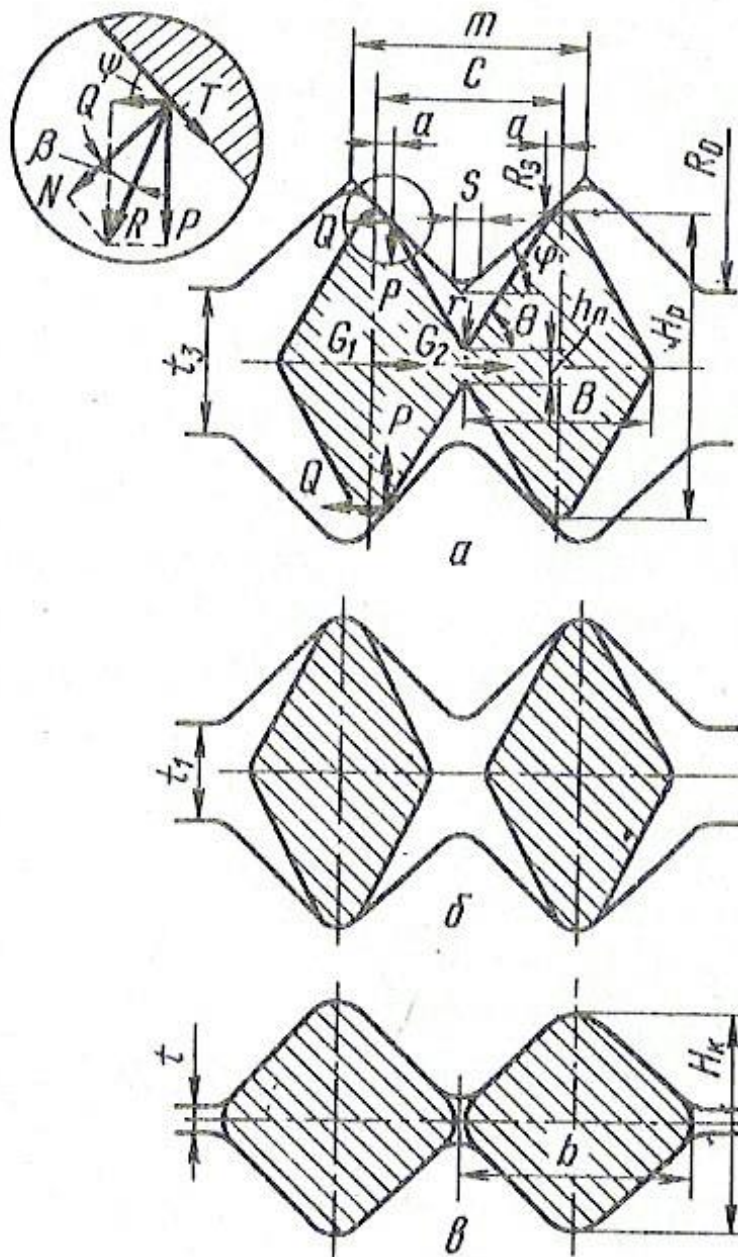


Рисунок 1.8 – Стадии продольного разделения сочлененного профиля в валках прокатного стана [14].

Освоение рассмотренной технологии двухручьевого прокатки - разделения сортовой квадратной заготовки 135 мм на стане 950/900 Донецкого металлургического завода им. В.И. Ленина позволило существенно сократить

цикл прокатки за счет уменьшения числа кантовок и длины раската. Производительность стана увеличилась на 10 – 12% [37].

Уральским институтом металлов совместно со специалистами металлургического завода ОАО «Амурметалл» на непрерывном мелкосортно-проволочном стане 320/150 освоена технология прокатки – разделения «контролируемого разрыва» в чистовой группе клетей при прокатке арматурных профилей №10, №12 [38 - 40]. Прокатка на стане производится из непрерывнолитой заготовки квадратного сечения со стороной 125 мм. При разработке процесса прокатки – разделения калибровки валков черновой и промежуточной групп оставили такими же, как при прокатке обычным способом, только изменили режим обжатий на более интенсивный с целью уменьшения площади поперечного сечения прокатываемых полос. Подготовка к разделению, разделение сочлененного профиля и получение готовой продукции осуществляется в чистовой группе клетей. Пример калибровки арматуры №10 и темплеты поперечного сечения раскатов приведены на рисунке 1.9. В первой клетке чистовой группы по схеме овал – квадрат формируется раскат квадратного сечения со стороной 20 мм. С целью улучшения центрирования при дальнейшей прокатке квадрат имеет выгнутые стороны. После кантовки на  $45^0$  в 14 и 15 клетях формируется сочлененный профиль. Вертикальные клетки №16 и №18 чистовой группы в процессе не используются. Стенки ручьев калибров 15 и 17 клетки выполнены стрельчатыми для получения квадратного сечения с выпуклыми гранями. Продольное разделение сочлененного профиля осуществляется разрывом в валках горизонтальной клетки 17. Полученные квадраты при помощи специально разработанной валковой арматуры задаются в овальные калибры клетки 19. Окончательная прокатка готового профиля осуществляется в вертикальной клетке 20.

Освоение рассмотренной выше технологии а непрерывном мелкосортно-проволочном стане 320/150 металлургического завода ОАО «Амурметалл» позволило повысить часовую производительность на 60%, снизить удельный расход электроэнергии на 60 – 70 кВт\*ч на тонну готовой продукции.

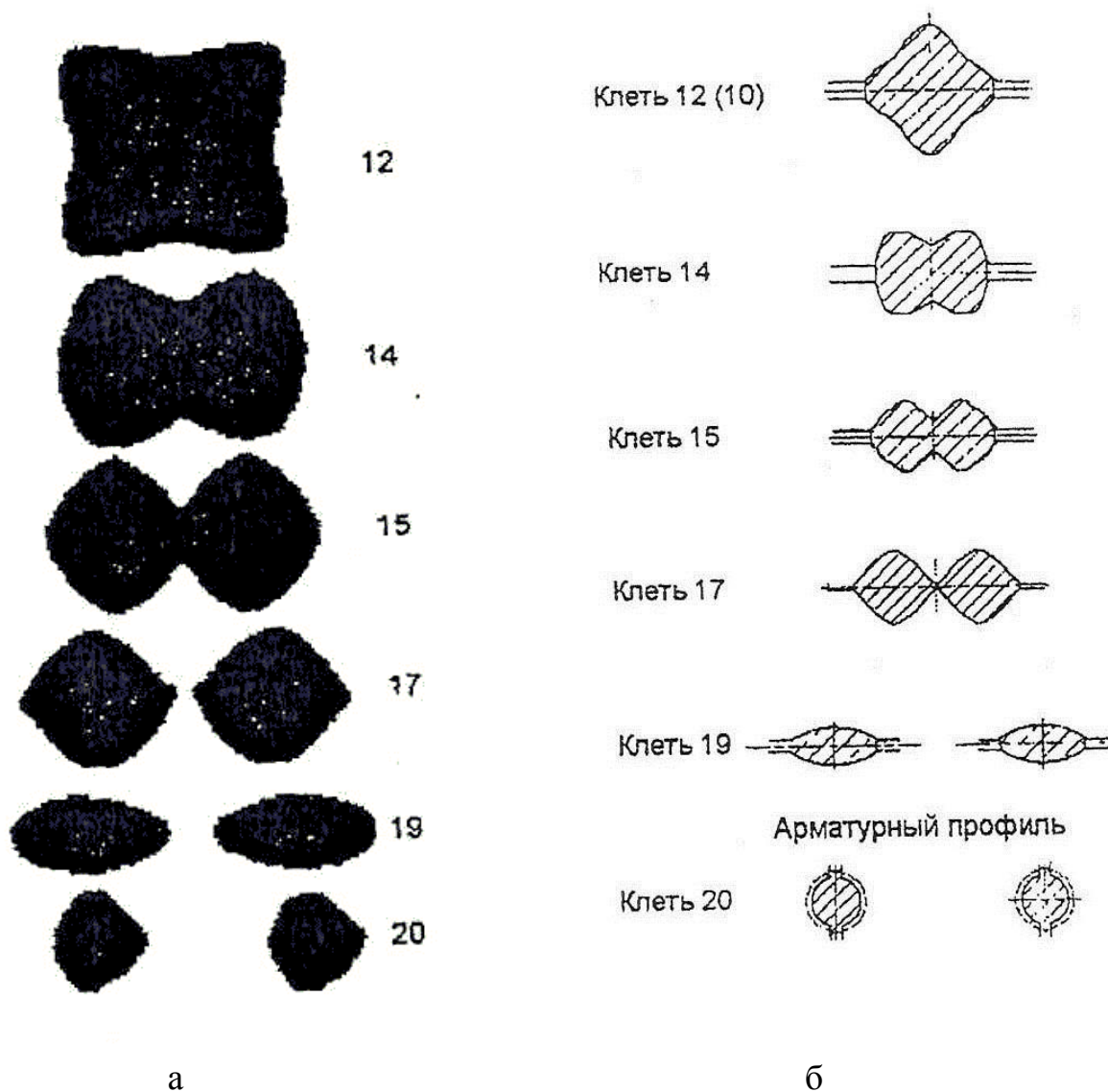


Рисунок 1.9 – Темплеты поперечных сечений раскатов при двухручьевой прокатке-разделении на стане 320/150 ОАО «Амурметалл» арматурной стали №10 (а) и калибровка (б) [38, 39]

Технология двухручьевой прокатки-разделения арматурных профилей с продольным разделением в прокатных валках разрывом перемычки в настоящее время используется на Омутнинском металлургическом заводе, Нижнесергиевском метизно-металлургическом заводе, Енакиевском металлургическом заводе, на металлургическом заводе ОАО «Амурметалл», на непрерывных мелкосортных станах 250-1, 250-3, 250-4 металлургического комбината "Криворожсталь" (ОАО «Миттал Стил Кривой Рог») [10, 14, 33].

Анализ продольного разделения раскатов разрывом перемычки в рабочих валках прокатной клетки позволил сформулировать достоинства этого способа:

1. Повышение среднечасовой производительности на 30 – 60%.
2. Снижение энергозатрат в среднем на 60 – 70 кВт\*ч на 1 т.
3. Отсутствуют дополнительные устройства для продольного разделения раската и, соответственно, необходимость их обслуживания.
4. Снижение расходного коэффициента металла и высокая точность разделения.
5. При разделении форма поперечного сечения и площадь не искажаются.

Недостатками этого способа является:

1. Использование приводной клетки с мощным двигателем для низкоэнергетической операции продольного разделения [44].
2. Число разделяемых полос не превышает трех.
3. Необходима высокая жесткость клетки, где происходит разделение.
4. Сложная вводная и выводная арматура, обеспечивающая процесс разделения и последующей прокатки.
5. Форма разделенного профиля только квадрат, что усложняет настройку валковой арматуры при кантовке на  $45^0$  и усложняет выполнение ребер арматурных профилей.

Все перечисленные выше способы продольного разделения объединяет один общий признак – формирование сочлененного профиля и продольное разделение осуществляется в валках прокатного стана. Такая особенность, кроме перечисленных недостатков, присущих разным схемам разделения, имеет общие проблемные моменты, такие как: ограниченное количество одновременно разделяемых полос (не более трех), большие затраты энергии на разделение в прокатных клетях, сложность настройки клетки, в которой одновременно необходимо формировать сочлененный профиль и разделять перемычку.

Таких недостатков лишены способы, предусматривающие поочередное выполнение операций формоизменения и разделения заготовок. Рассмотрение данных способов начнем с газопламенной резки сформированной предварительно перемычки [14]. Схематично такой способ разделения показан на рисунке 1.10.

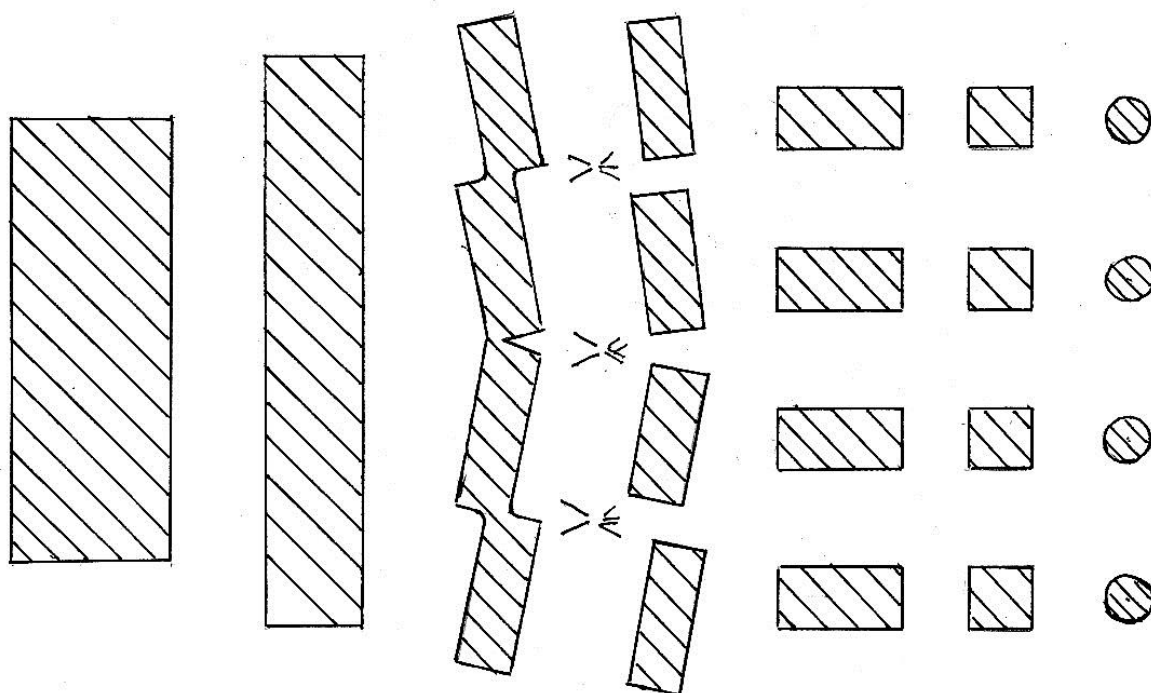


Рисунок 1.10 – Разделение перемычки газопламенной резкой [14]

В качестве заготовки предлагается использовать непрерывнолитой сляб, который, по выходе из кристаллизатора машины непрерывного литья, подогревают и обжимают с суммарным коэффициентом вытяжки 1,5...2. Во время этой операции происходит уплотнение осевой части литой заготовки и ее гомогенизация. Дальнейшее уплотнение металла раската совмещают с прокаткой - разделением на прямоугольные заготовки с общей вытяжкой 2,3...3,5. Затем окончательно разделяют раскат на 2...8 самостоятельных заготовок с помощью газокислородных резаков. После порезки каждую заготовку кантуют и прокатывают с ребровым обжатием при коэффициенте суммарной вытяжки 2,5...3,5 до получения сечения близкого к квадратному. Ребровое обжатие снимает анизотропию свойств металла в подкате. Окончательное

формирование катанки осуществляется в зависимости от размеров готового профиля.

Определенный практический интерес вызывает горячая абразивная резка перемычки между профилями (рисунок 1.11). По данным работы [45], процесс резания возможен при температуре 600...1100 °С, т. е. в потоке стана, при помощи абразивных кругов диаметром 400...1800 мм и толщиной 4...20 мм, армированных стекловолокном. В качестве материала кругов рекомендуется корунд на связке из синтетической смолы. С учетом производительности, составляющей 10...30 см<sup>2</sup>/с, такой способ разделения можно использовать при резке малотоннажных партий.

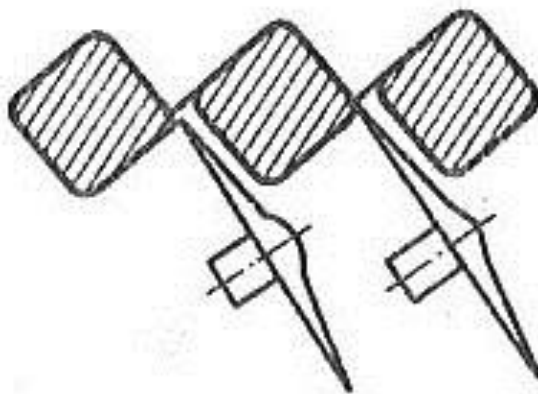


Рисунок 1.11 – Разделение сочлененной заготовки абразивной резкой [45].

К одному из вариантов механического разделения полосы относится способ [18], согласно которому заготовка разделяется на части при помощи ножа, неподвижно установленного за клетью (рисунок 1.12). Форма режущей части ножа разнообразна и зависит от конкретных условий применения. Проведенные лабораторные эксперименты показали хорошие результаты. К недостаткам способа относится низкая стойкость ножа, что значительно затрудняет использование данной технологии на высокопроизводительных станах.

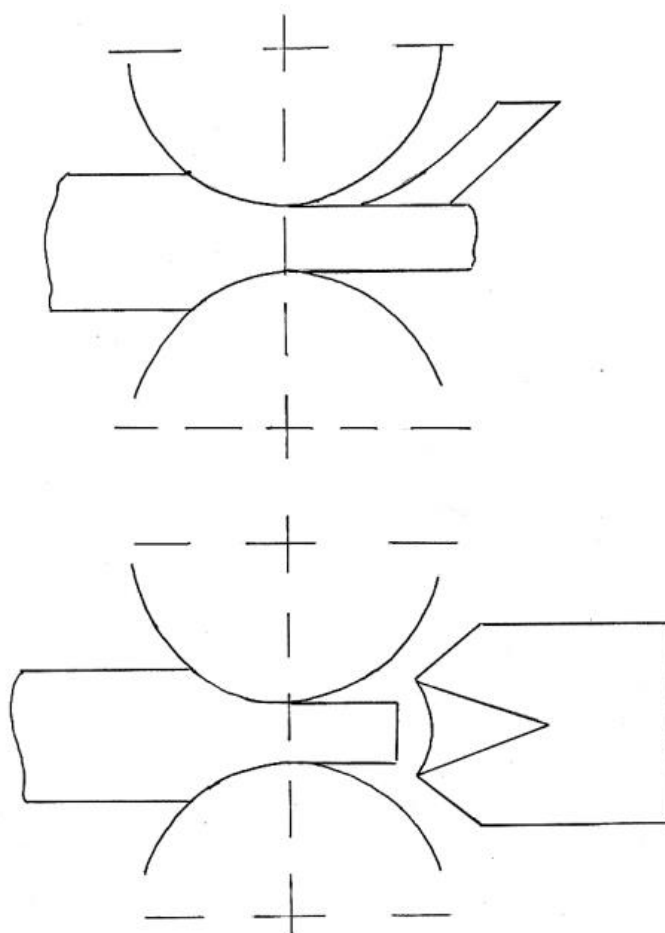


Рисунок 1.12 – Разделение при помощи неподвижно установленного за клетью ножа [18]

Основным недостатком рассмотренных выше автономных делительных устройств является их низкая производительность, сложность установки в технологическую линию прокатного стана, не высокая надежность устройств, совершающих разделение сочлененных профилей.

Решение проблем использования автономных делительных устройств было найдено инженерами канадской фирмы «Co-Steel International» и используется в настоящее время на заводах фирм «Lake Ontario Steel» (Канада), «Sheernese Steel» (Великобритания), «Shapparel Steel» и «North Star Steel» (США), «Tosin-Seiko» (Япония), а также на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (Россия), «Белорусском металлургическом заводе» (Белоруссия), «Молдавском металлургическом заводе» (Молдавия) [50 – 52]. Разработчика технологии назвали ее «slit-rolling» (слиттинг-процесс).

Отличительной особенностью процесса является использование для разделения неприводных роликов, установленных в непосредственной близости за клетью, формирующей окончательный сочлененный профиль. Для разделения сочлененного профиля неприводными роликами используется разрыв, реже - передавливание. Разделение в неприводных роликах осуществляется за счет резерва сил трения в очаге деформации клетки формирующей окончательный сочлененный профиль. Процесс прокатки – разделения с использованием неприводных делительных роликов только в непрерывных группах клетей. Наиболее удачно для этой цели подходят непрерывные мелкосортные и мелкосортно – проволочные станы с большим объемом арматурных профилей в сортаменте.

Простота реализации, существенные преимущества по сравнению с другими способами разделения сочлененных профилей разрывом или передавливанием в неприводных делительных роликах вызывает повышенный интерес у производителей и необходимость всестороннего изучения и совершенствования. Большая работа по изучению прокатки – разделения в неприводных делительных устройствах, адаптация этой технологии к промышленным условиям была проведена на Белорусском и Молдавском металлургических заводах, АО «ЕВРАЗ ЗСМК», ПАО «ММК». Существенный вклад в развитие и совершенствование технологии прокатки – разделения с использованием неприводных делительных устройств внесли С.М. Жучков, Э.В. Сивок, Л.В. Кулаков, О.Н. Тулупов, А.Б. Моллер, В.Н. Перетяцько [7, 8, 31, 53, 55 – 58 и др.].

Как было отмечено выше, прокатка – разделение с использованием неприводных делительных устройств реализуется в чистовых клетях непрерывных групп мелкосортных и мелкосортно-проволочных станов. Прокатка в черновых и промежуточных группах клетей ведется в системах вытяжных калибров, обычно овал-ребровой овал, с получением круга в последней клетке промежуточной группы. В чистовой группе из круглой заготовки за несколько пропусков формируется сочлененный профиль. Некоторые схемы

расположения калибров, формирующих сочлененный профиль, показаны на рисунке 1.13 [48, 56].

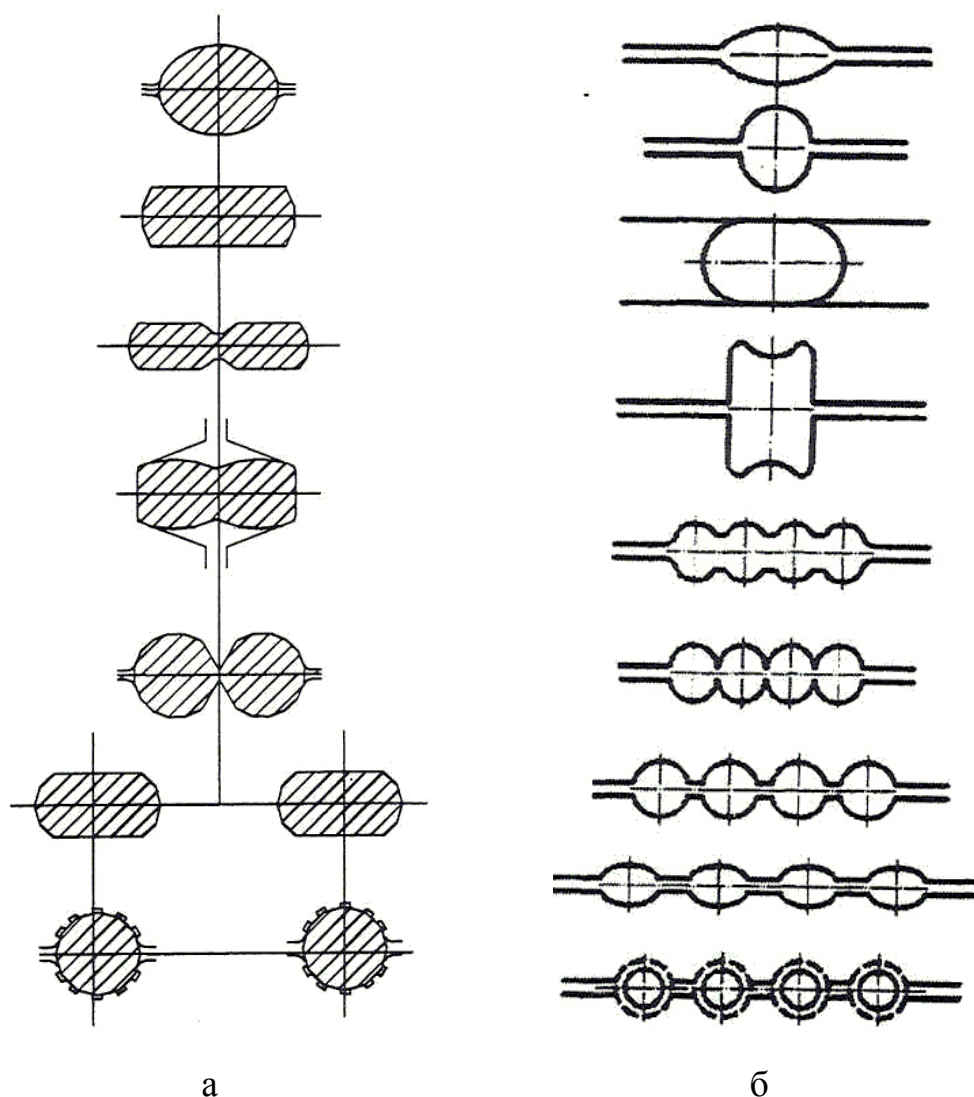


Рисунок 1.13 – Схемы формирования сочлененных профилей с последующим разделением [48, 56] а – разделение на две заготовки; б – разделение на четыре заготовки

Сформированный сочлененный профиль разделяется на части неподвижным делительным устройством, размещенным в непосредственной близости от очага деформации клетки, из которой выходит сочлененный профиль. Такая компоновка оборудования обусловлена опасностью потери устойчивости сочлененного профиля при разделении.

Конструкция делительных устройств бывают двух видов: одноопорные и двухопорные (рисунок 1.14, 1.15). При использовании одноопорного

устройства улучшается обзорность и контроль за процессом разделения, упрощается обслуживание и сокращается время при ликвидации буруния. Однако жесткость одноопорной конструкции невелика. Основное достоинство двухопорной конструкции - это высокая жесткость.

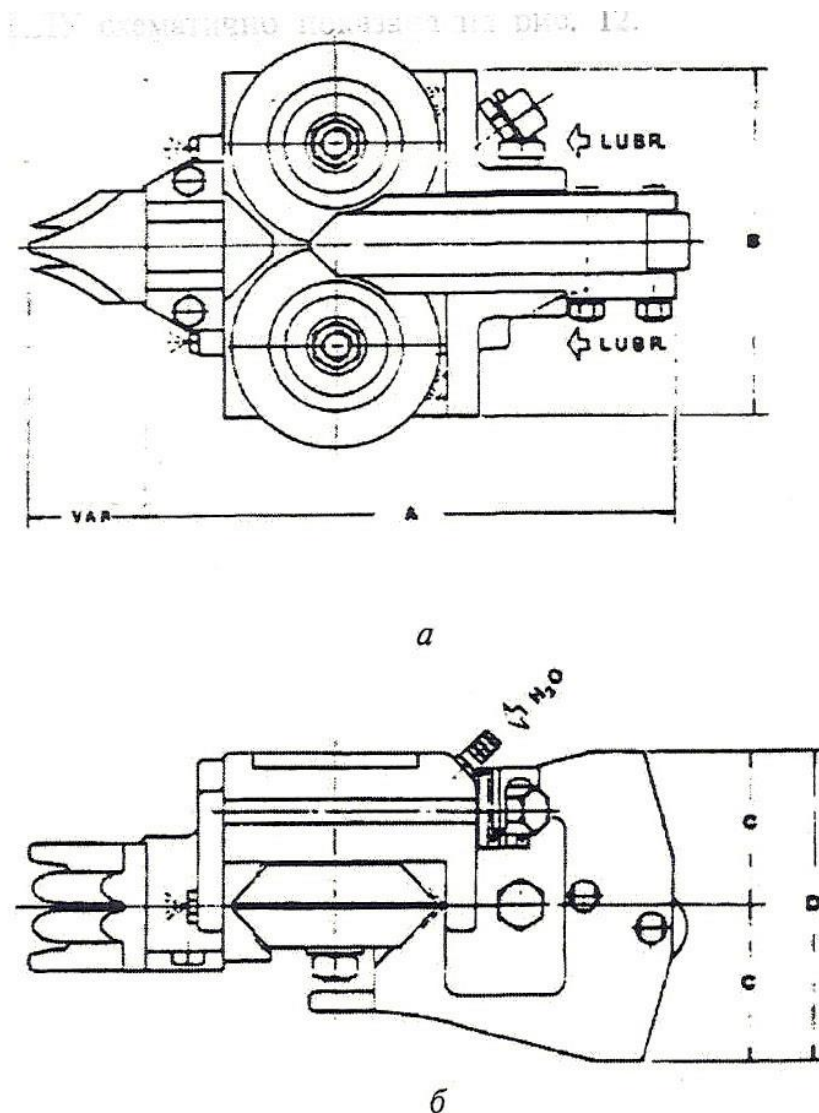
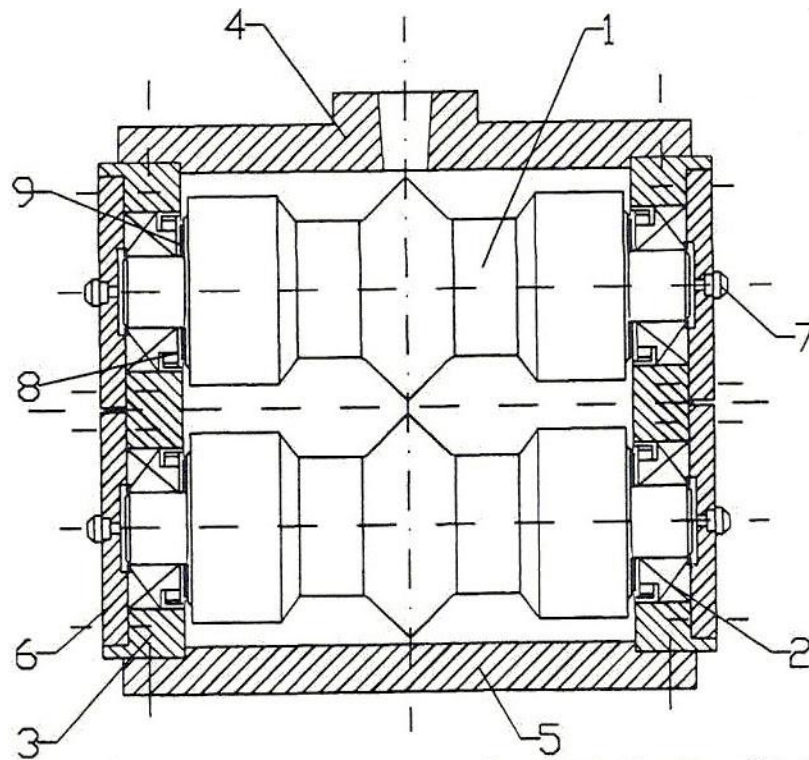


Рисунок 1.14 – Одноопорное делительное устройство фирм MGS и «Daniely» [56]: а – вид сбоку; б – вид сверху

Разделенные заготовки при помощи валковой арматуры специальной конструкции поступают в предчистовую клет, обычно с овальным калибром, и после прокатки в ней и кантовки в чистовой клети получают готовый арматурный профиль.



1- делительные ролики; 2 – подшипники; 3 – боковые стойки корпуса; 4 – крышка корпуса; 5 – основание корпуса; 6 – торцевые крышки; 7 - масленки; 8 – защитные кольца; 9 - прокладка

Рисунок 1.15 – Двухопорное делительное устройство фирмы «Fettsco» (Великобритания) [56]

Изучение прокатки – разделения с использованием неприводного делительного устройства позволило оценить достоинство данного способа разделения, к которым относится:

1. Увеличение часовой производительности за счет сокращения длины сочлененной заготовки. По данным работ [52, 54] при прокатке арматурного профиля №16 часовая производительность увеличилась на 35 т/ч, а для № 13 увеличение составило 26 т/ч. При прокатке арматурных профилей на стане 320/150 Беларусского металлургического завода №10 увеличение часовой производительности составило 37 т/ч, №12 – 44 т/ч, №14 – 25 т/ч [59].

2. Снижение энергозатрат на производство. Уменьшение энергозатрат связано с увеличением температуры конца прокатки, которая может составлять 40 – 50<sup>0</sup>С [25]. Вторая составляющая уменьшения энергозатрат связана с

тем, что энергетически разделить вдоль полосу на две части, уменьшив площадь поперечного сечения, в два раза выгодней, чем деформировать ее с коэффициентом вытяжки 2. По данным работы [56] при двухручьевой прокатки – разделении расход электроэнергии уменьшается на 12 – 25%, при четырехручьевой до 30%. По результатам работы [50] снижение энергозатрат при двухручьевой прокатки – разделении составил 15%.

3. Уменьшение количества клетей, участвующих в получении готовой продукции, и, как следствие, снижение расхода валков. Как следует из работы [52] расход валков снижается при двухручьевой прокатки – разделении на 15%, а при четырехручьевой – на 20%.

4. Увеличение точности размеров готового профиля на 5 – 20% [25].

5. Возможность использования более крупной по сечению заготовки, не увеличивая число клетей на стане.

6. Возможность одновременного деления до пяти полос (рисунок 1.16).

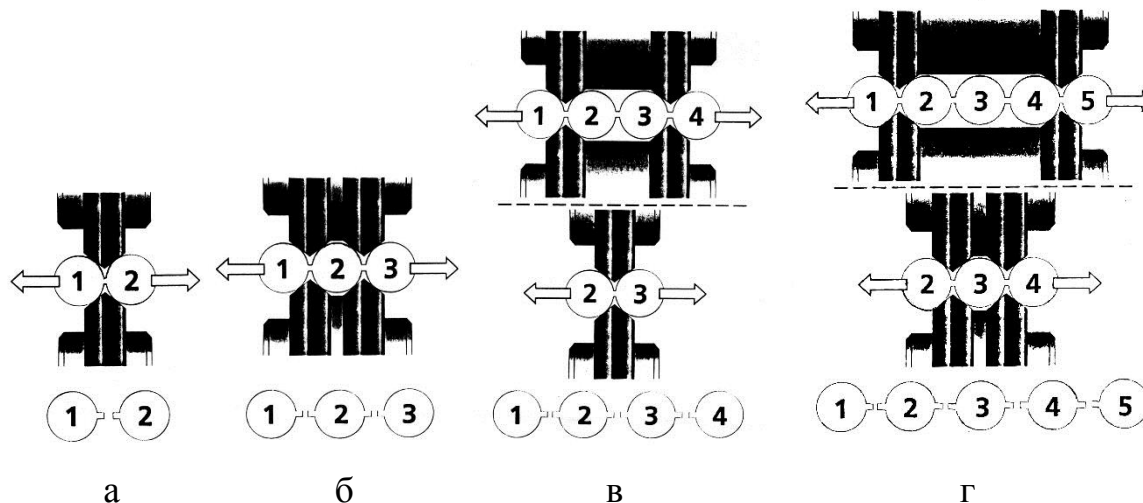


Рисунок 1.16 – Разделение сочлененных профилей с разным количеством элементов: а – на две части; б – три части; в – четыре части; г – пять частей [52]

К недостаткам можно отнести :

1. Ограниченная область использования только на непрерывных мелко-сортных и мелкосортно-проволочных станах при получении арматурных

профилей, что связано с особенностью разделения неприводным устройством и возможностью образования в месте раздела заусенца.

2. Высокие требования по жесткости к клети, формирующей окончательный сочлененный профиль с толщиной перемычки 1 мм, и чувствительность к износу валков этой клети. Невыполнение данного условия приводит к аварийным ситуациям и браку.

3. Сложность конструкции делительного устройства, низкая стойкость делительных роликов, возможность потери устойчивости в промежутке между клетью и делительным устройством.

4. Малая изученность в теоретическом плане процесса разделения и факторов, на него влияющих.

Несмотря на имеющиеся недостатки технология прокатки – разделения с использованием неприводных делительных устройств активно используется на действующих и проектируемых мелкосортных и мелкосортно - проволочных станах в России и за рубежом. Основная тенденция развития технологии связана с освоением разделения сочлененных полос на три и четыре нитки [46 - 48]. В этом направлении ведутся работы на новых мелкосортных станах ЗАО «Нижнесергиевский металлургический завод» и ПАО «ММК» [53, 60].

На сегодняшний момент способ прокатки – разделения с использованием неприводных делительных устройств самое перспективное направление у нас в стране и за рубежом.

Все рассмотренные выше способы предусматривают разделение в горячем состоянии в потоке стана. Однако, имеются способы холодного разделения спаренных готовых профилей. Обычно, разделение в холодном состоянии применяется при прокатке несимметричных профилей в сдвоенном виде (полособульбовые профили, лемехи, направляющие турбинных лопаток и др.). Так, например, прокатка лезвия составного лемеха для плугов [61] производилась в сдвоенном тонкими частями виде, а разделение профилей уже в холодном состоянии осуществлялось у потребителя. Аналогичным способом

прокатывались и направляющие турбинных лопаток на опытном заводе Украинского научно-исследовательского института металлов.

Прокатка полосы 65х6 мм проводилась на стане 400 Донецкого металлургического завода им. Петровского в сдвоенном виде с формированием в месте соединения концентратора напряжений, а разделение производилось в холодном состоянии на правильной машине путем ломки сдвоенной полосы знакопеременным изгибом перемишки [62].

Нижнесергинским металлургическим заводом совместно с УралНИИЧМ на стане 250 была освоена технология многоручьевого прокатки арматурного профиля № 14. Был прокатан четырехниточный раскат, состоящий из четырех, соединенных между собой, периодических арматурных профилей. Разделение профилей производили в холодном состоянии дисковыми ножницами. Качество поверхности разделенных профилей получили удовлетворительным.

Однако, разделение сдвоенной полосы вне потока стана требует наличия дополнительного оборудования и, как правило, применения ручного труда. Использование этого варианта прокатки-разделения наиболее рационально при производстве асимметричных фасонных профилей, прокатка которых в одинарном виде обычно сопровождается искривлением при охлаждении на холодильнике и требует последующей правки.

Проведенный анализ способов продольного разделения заготовок дает основание считать наиболее предпочтительным способ разделения неприводным делительным устройством, установленными в непосредственной близости от приводной клетки. Такой способ разделения позволяет решить одну из основных проблем связанную с качеством разделения. Решение этой проблемы позволяет значительно расширить сортамент профилей получаемых прокаткой – разделением, который в настоящее время ограничен только арматурными профилями. Использование резервных сил трения очага деформации клетки, за которой установлено неприводное делительное устрой-

ство, позволяет более полно использовать подводимую в очаг деформации мощность и, соответственно, увеличить КПД процесса.

## **1.2. Теоретическое и экспериментальное изучение процесса прокатки-разделения**

Экспериментальным и теоретическим изучением всевозможных разновидностей процесса прокатки – разделения занимаются более 50 лет. Большой вклад в изучение и практическое использование на промышленных предприятиях внесли работы В.М. Клименко, В.Ф. Губайдулина, Г.Н. Шульгина, С.М. Жучкова, В.М. Следнего и др. [14, 18, 19, 32]. Заложенные ими основы послужили фундаментом для теоретического обоснования выбора рациональных режимов ведения процесса прокатки – разделения. Обобщение экспериментального материала позволило получить удобные для инженерных расчетов зависимости для проектирования калибровок и расчета технологических параметров процесса прокатки – разделения.

При изучении кинематических условий прокатки в сочлененных ромбических калибрах В.М. Клименко использовал современный метод математического планирования эксперимента [63]. Использование этого прогрессивного метода позволило получить объективную информацию о продольной и поперечной деформации при формировании сочлененного профиля в калибре.

Для проведения теоретических исследований по изучению течения металла при заполнении калибров, формирующих сочлененный квадратный профиль, авторами работ [14, 18] использовался вариационный аппарат, с помощью которого определены зависимости для нахождения площади контакта и уширения.

Интересный материал по разделению в калибре приведен в работах [64, 65]. Получены теоретические зависимости, описывающие условия разделения разрывом в валках прокатного стана. При всей привлекательности полу-

ченных зависимостей большое опасение вызывает их достоверность. Опасения обусловлены отсутствием информации об экспериментальной проверке полученных теоретических формул.

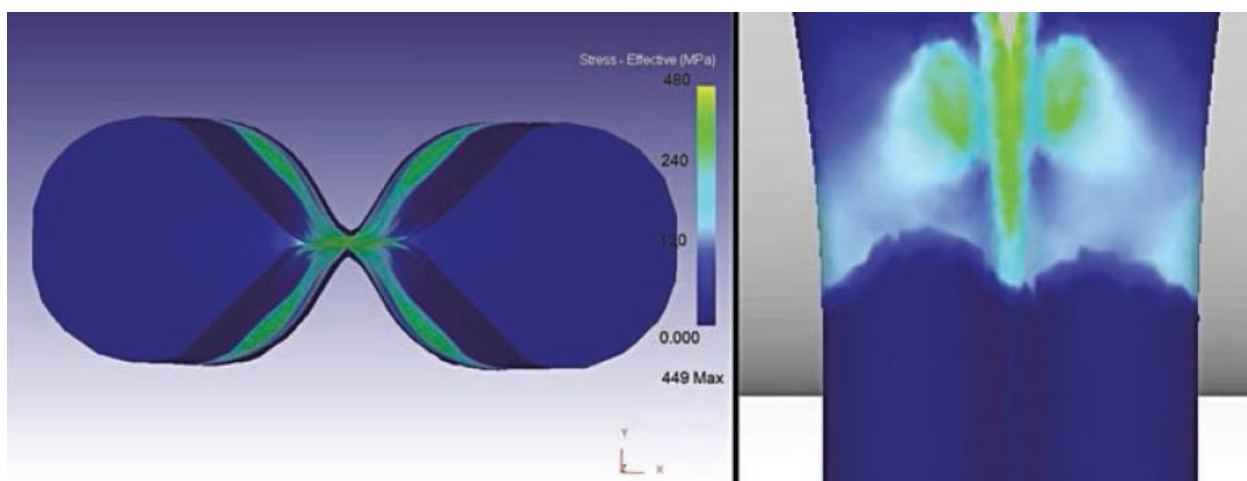
В последнее время для изучения процесса прокатки – разделения активно используются компьютерные технологии и пакеты прикладных программ [66, 67]. В приведенных работах при помощи компьютерного моделирования изучали условия формоизменения при формировании сочлененного профиля, а также распределение напряжений при разделении перемишки. Однако полученные результаты не подтверждены лабораторными экспериментами.

В более поздних работах [68-70] методом компьютерного моделирования изучали формирование сочлененного профиля и условия разрыва в неприводном делительном устройстве. На рисунке 1.17 показаны стадии формирования и разделения при слиттинг - процессе прокатки арматурного профиля №20 [68]. Проведенные численные исследования позволили установить оптимальную толщину перемишки в 1 мм для последующего разрыва. Большая толщина перемишки будет приводить к образованию в месте разрыва заусенца, который при последующей прокатке может перейти в закат.

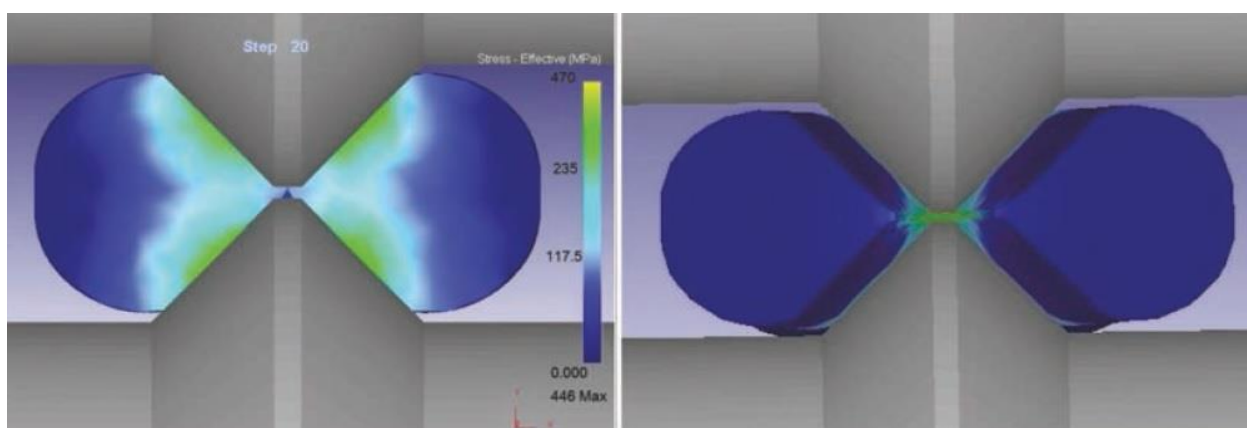
Большая работа по изучению слиттинг-процесса проведена сотрудниками ИЧМ НАН Украины Жучковым С.М., Кулаковым Л.В., Лохматовым А.П., Сивок Э.В. и др. [1, 8, 10, 20, 25, 29-31, 59, 71-76]. Разработаны конструкции делительных устройств, предложены различные варианты калибровок для формирования сочлененных профилей. Изучена устойчивость сочлененной полосы в промежутке между прокатной клетью и неприводным делительным устройством. Предложено оценивать устойчивость по критической силе ( $P_{кр}$ ), определяемой с использованием преобразованной формулы Эйлера вида:

$$P_{кр} = \frac{4 E \sigma_T S}{\left( \sqrt{E} + \frac{\nu \lambda}{\pi} \sqrt{\sigma_T} \right)^2}, \quad (1.1)$$

где  $E$  – модуль упругости Юнга;  $\sigma_T$  – предел текучести материала;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $\lambda$  – гибкость раската, равная отношению длины межклетьевого промежутка к радиусу инерции поперечного сечения раската;  $\nu$  – коэффициент, учитывающий способ заделки концов раската в промежутке «приводная прокатная клеть-неприводное делительное устройство».



а



б

Рисунок 1.17 – Компьютерное моделирование слиттинг-процесса.

а) формирование сочлененного профиля; б) разделение разрывом неприводным инструментом

Критическое напряжение подпора ( $\sigma_{кр}$ ), определяющее возможность изгиба раската:

$$\sigma_{кр} = \frac{4 E \sigma_T}{\left( \sqrt{E} + \frac{v \lambda}{\pi} \sqrt{\sigma_T} \right)^2}. \quad (1.2)$$

Превышение расчетных значений критической силы или критического напряжения недопустимо, т.к. приведет к потере устойчивости полосы в промежутке прокатная клетка- неприводное делительное устройство.

В работах Перунова Г.П., Смирнова В.К., Инатовича Ю.В. [38, 56, 77] предложены зависимости для определения рациональных размеров калибров, формирующих сочлененный профиль. При прокатке в сочлененном калибре с ручьями ящичной формы ширину заготовки ( $B_0$ ) предлагается определять по формуле:

$$B_0 = B_d + \frac{2 B_{гр} \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} (\alpha / 2)}, \quad (1.3)$$

где  $B_d$  – ширина калибра по дну;  $B_{гр}$  – ширина разрезного гребня;  $\varphi$  – угол выпуска калибра;  $\alpha$  – угол развала разрезного гребня.

При прокатке в калибрах с ручьями круглой формы ширина заготовки определяется по формуле:

$$B_0 = 4 R \cos \varphi, \quad (1.4)$$

где  $R$  – радиус ручья круглой формы.

Получены экспериментальные зависимости для расчета коэффициента уширения ( $\beta=B_1/B_0$ ) при прокатке в калибрах с ручьями ящичной формы:

$$\beta = 1 + 0,115 \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right)^{0,9} A^{0,51} \operatorname{tg} \varphi^{0,26} \alpha_0^{0,763} \left[ \cos \left( 90 - \frac{\alpha}{2} \right) \right]^{-0,6} \psi^{0,16}, \quad (1.5)$$

где  $1/\eta$  – коэффициент обжатия по дну калибра ( $H_0/H_1$ );  $A$  – приведенный диаметр валков ( $A = \frac{D_0 - H_1}{H_1}$ );  $\alpha_0$  – отношение сторон полосы, задаваемой в калибр ( $H_0/B_0$ );  $\psi$  – параметр, учитывающий контактное трение.

При прокатке в сочлененном калибре с ручьями круглой формы:

$$\beta = 1 + 0,104 \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right)^{0,37} A^{0,48} \operatorname{tg} \varphi^{-0,34} \alpha_0^{0,763} \psi^{0,16} . \quad (1.6)$$

Площадь поперечного сечения полосы в зависимости от формы сочлененного калибра предлагается определять по формуле:

$$\varpi_1 = H_1 B_1 \frac{(B_0 - B_d)^2}{4 \operatorname{tg}^2 \varphi} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \frac{(B_1 - B_d)^2}{2 \operatorname{tg} \varphi} . \quad (1.7)$$

В калибре с ручьями круглой формы:

$$\varpi_1 = \left[ H_1 - \frac{B_0}{2} \operatorname{tg} \left( \frac{90 - \varphi}{2} \right) \right] B_1 + 0,36 B_0^2 \operatorname{tg} \left( \frac{90 - \varphi}{2} \right) . \quad (1.8)$$

Как показали исследования приведенные в работе [25] при классической прокатке арматуры имеет место существенное падение температуры в черновых клетях благодаря небольшой скорости прокатки и повышение температуры выше необходимых значений в чистовых клетях. Такое положение приводит к увеличению энергозатрат и ухудшению механических свойств готовой продукции. При реализации технологии прокатки-разделения в условиях стана 320 РУП «БМЗ» наблюдали в черновых клетях повышение, а в чистовых понижение температуры, что позволило за счет равномерного распределения температур по клетям снизить энергозатраты и повысить качество готовой продукции.

Широкое использование технологии слиттинг-процесса вызвало необходимость изучения механических свойств готовой продукции, полученной по данной технологии. Этот вопрос изучался в работах [68, 78-81]. Рассмотрена структура и механические свойства готовой продукции, которые полностью соответствовали требованиям потребителя и не имели отклонений в худшую сторону от профилей, получаемых по классической технологии. Установлено [78], что при двухручьевой прокатке-разделении процессы релаксации проходят значительно быстрее, чем при классической прокатке. После термомеханического упрочнения арматурного профиля №12 из стали СтЗпс, полученного слиттинг-процессом, в осевой зоне сформировалась

«структура феррита с сетчатой и фрагментированной дислокационной субструктурой, перлита и квазиперлита. Феррит содержит наноразмерные частицы цементита (20-30 нм) округлой формы». [80] По сечению имеется структурная неоднородность: ярко выраженный поверхностный слой, переходный и осевая зона.

Представляют практический интерес работы, направленные на повышение эффективности технологии слиттинг-процесса с точки зрения улучшения качества готовой продукции, выбора оптимального количества разделяемых сочлененных профилей [82-84].

Анализируя результаты исследований процесса прокатки-разделения, можно сказать, что наиболее востребованным является процесс прокатки – разделения с использованием неприводного устройства (слиттинг-процесс). Такое положение связано с преимуществами данной технологии, подробно описанной выше. Несмотря на очевидные преимущества приема разделения операций формирования сочлененного профиля и продольного разделения неприводным устройством (слиттинг-процесс), многие ключевые вопросы остаются не изученными. Отсутствует информация о величине продольной силы, обеспеченной резервом сил трения в очаге деформации клетки, формирующей сочлененный профиль, и используемой в дальнейшем для продольного разделения неприводным устройством. Нет строгого математического решения задач по продольной устойчивости сочлененного профиля, по величине продольной силы, необходимой для разделения неприводным устройством известными способами. Разрозненные, иногда противоречивые данные об условиях реализации процесса прокатки – разделения с использованием неприводного устройства затрудняют внедрение данной технологии и разработку рациональных режимов ведения процесса.

### 1.3 Цель и задачи диссертационной работы

Анализ литературных источников позволил сформулировать основные выводы:

1. Важной актуальной задачей, стоящей перед металлургами России, является дальнейшее совершенствование прокатных технологий с целью их интенсификации на основе разработки новых технических и технологических решений, что позволит увеличить объемы производства, снизить материальные и энергетические затраты.

Увеличение объемов выпуска арматурного проката и снижение его себестоимости будет способствовать реализации важного национального проекта по развитию строительной отрасли России. В настоящее время большая часть арматурных профилей производится на мелкосортных и мелкосортно-проволочных станах.

2. Как показала практика, перспективным решением увеличения объемов производства, снижения материальных и энергетических затрат является использование процесса прокатки – разделения. В отечественной и зарубежной литературе предложены способы разделения раската на две, три, четыре и даже пять готовых арматурных прутков. Однако до настоящего времени не получены теоретические зависимости, позволяющие определить область осуществимости перспективного процесса прокатки – разделения с использованием неприводных делительных устройств (слиттинг-процесс) в зависимости от условий прокатки.

3. В настоящее время предложено и запатентовано много способов реализации процесса прокатки – разделения. Однако практически используются только два: разделение в валках прокатной клетки и разделение в отдельно стоящем неприводном делительном устройстве.

4. Большой вклад в изучение процесса прокатки – разделения внесли отечественные и зарубежные ученые. В их научных трудах приведен экспериментальный и теоретический материал по изучению различных факторов,

влияющих на формирование сочлененных профилей различной формы и продольного деления известными способами.

Однако до настоящего времени не определены рациональные режимы деформирования, обеспечивающие стабильное деление в неприводных делительных устройствах.

5. В литературе отсутствуют теоретические зависимости и достаточное количество экспериментального материала для оценки величины резерва сил трения клетки, формирующей сочлененный профиль. Крайне мало информации по величине продольной силы, необходимой для деления в неприводном устройстве, в зависимости от способа деления. Такое положение существенно затрудняет определение рациональных режимов прокатки - деления с использованием неприводного делительного устройства (слиттинг-процесс). Нерешенным остается вопрос о продольной устойчивости полосы в промежутке между очагом деформации клетки, формирующей сочлененный профиль, и неприводным делительным устройством.

В соответствии с полученными выводами сформулирована **цель** диссертационной работы: разработка научно-обоснованных решений по выбору рациональных режимов формирования и деления сочлененных профилей при прокатки – разделении с использованием неприводного делительного устройства, направленных на снижение материальных затрат при производстве арматурных профилей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математические зависимости для определения величины продольной силы, обеспеченной резервом сил трения в очаге деформации клетки, формирующей сочлененные профили, наиболее часто используемые на практике. Проверить экспериментально достоверность полученных теоретических зависимостей и выявить перспективные условия формирования сочлененных профилей.

2. Предложить теоретические зависимости для нахождения силы, необходимой при разделении сочлененных профилей передавливанием, разры-

вом, и оценить экспериментально достоверность полученных моделей, а также влияние различных факторов на изучаемые процессы.

3. Изучить продольную устойчивость сочлененной полосы в промежутке между прокатной клетью и неприводным делительным устройством в процессе разделения. Оценить величину допустимого расстояния между клетью и неприводным делительным устройством гарантирующего соблюдение продольной устойчивости.

4. Обобщить полученные теоретические и экспериментальные результаты в алгоритм для определения области осуществимости процесса прокатки – разделения с использованием неприводных делительных устройств, а также определения рациональных режимов формоизменения и разделения.

5. Сформулировать на основании проведенных исследований предложения по совершенствованию технологии прокатки – разделения арматурных профилей применительно к действующему производству. Применить результаты исследований в учебном процессе.

## **2 Теоретические исследования процесса прокатки-разделения с использованием неприводных делительных устройств**

### **2.1 Оценка резерва сил трения в очаге деформации клетки, формирующей сочлененный профиль**

Анализ известных технологий процесса прокатки-разделения показал, что наиболее перспективным является слиттинг-процесс, разделяющий операции формирования сочлененного профиля в прокатной клетке и продольного разделения в неприводном устройстве. Основной движущей силой такой технологии является резерв сил трения в очаге деформации клетки, формирующей сочлененный профиль. Величина резерва сил трения в очаге деформации может меняться в широких пределах в зависимости от условий деформирования, материала заготовки, форм калибров. Информация о величине резерва сил трения, а тем более зависимости, позволяющие ее определить для случая прокатки в калибрах, формирующих сочлененный профиль в литературе отсутствуют, что на практике приводит к возникновению аварийных ситуаций, браку по причине недокатов, непредвиденным простоям оборудования и в целом существенно тормозит внедрение этой материалосберегающей, энергоэффективной технологии при производстве арматурных профилей.

Согласно классическим представлениям, процесс прокатки проходит в две стадии: это стадия захвата и стадия установившегося процесса прокатки.

На стадии захвата в месте касания заготовки валков действуют две силы: нормально направленная сила  $N$  и приложенная тангенциально сила трения  $T$ . Захват осуществляется, когда горизонтальная проекция силы трения будет больше или равна горизонтальной составляющей нормальной силы. Угол приложения этих сил равен  $\alpha$ . При выполнении данного условия наступает процесс, называемый в теории прокатки естественным захватом. Если в процессе захвата на заготовку действуют внешние силы инерции или подпо-

ра, меняющие баланс сил, то такой захват называют принудительным [85], [86].

После захвата при заполнении очага деформации угол приложения равнодействующих нормальных и касательных сил постепенно уменьшается до величины  $\alpha/2$  при выходе переднего конца из очага деформации. Изменение угла приложения равнодействующих нормальных и касательных сил приводит к изменению их горизонтальных проекций. Горизонтальная составляющая равнодействующей сил трения увеличивается, а горизонтальная составляющая равнодействующих нормальных сил уменьшается, это приводит к появлению резерва сил трения. Для обеспечения баланса сил в очаге деформации появляется зона опережения, где силы трения направлены против хода прокатки тем самым обеспечивая баланс сил в очаге деформации. Таким образом, на установившейся стадии процесса прокатки избыток втягивающих сил трения, называемый в литературе резервом сил трения, уравнивается зоной опережения. Это является неременным условием равномерного движения заготовки в очаге деформации.

Любые изменения условий формоизменения приводят к необходимости корректировки баланса сил трения в очаге деформации. Силы трения, обладая определенной гибкостью, выполняют роль стабилизатора баланса сил трения. Изменение внешних условий на установившейся стадии процесса прокатки, например, при разделении неприводным устройством, часть резерва сил трения будет переведена в активное состояние, что приведет к уменьшению протяженности зоны опережения и увеличению зоны отставания. Рассмотренный механизм общепринят и встречается в работах авторитетных авторов, таких как И.М. Павлова, А.И. Целикова, В.Н. Выдрина [85, 87] и др.

Несмотря на важность проблемы использования потенциала резерва сил трения, данный вопрос остается недостаточно изученным, хотя на основе его возможностей разработаны такие совмещенные процессы, как прокатка – прессование, прокатка – разделение, прокатка в системе приводная - неприводная клеть [88-91]. Перспективность использования резерва сил трения на

установившейся стадии прокатки с использованием гладких и калиброванных валков показана в работах Фастыковского А.Р. [92-94].

В работе [94] возможности резерва сил трения оценены показателем  $K_N$ , являющимся отношением мощности, подводимой в очаг деформации, к мощности, используемой для формоизменения (рисунок 2.1).

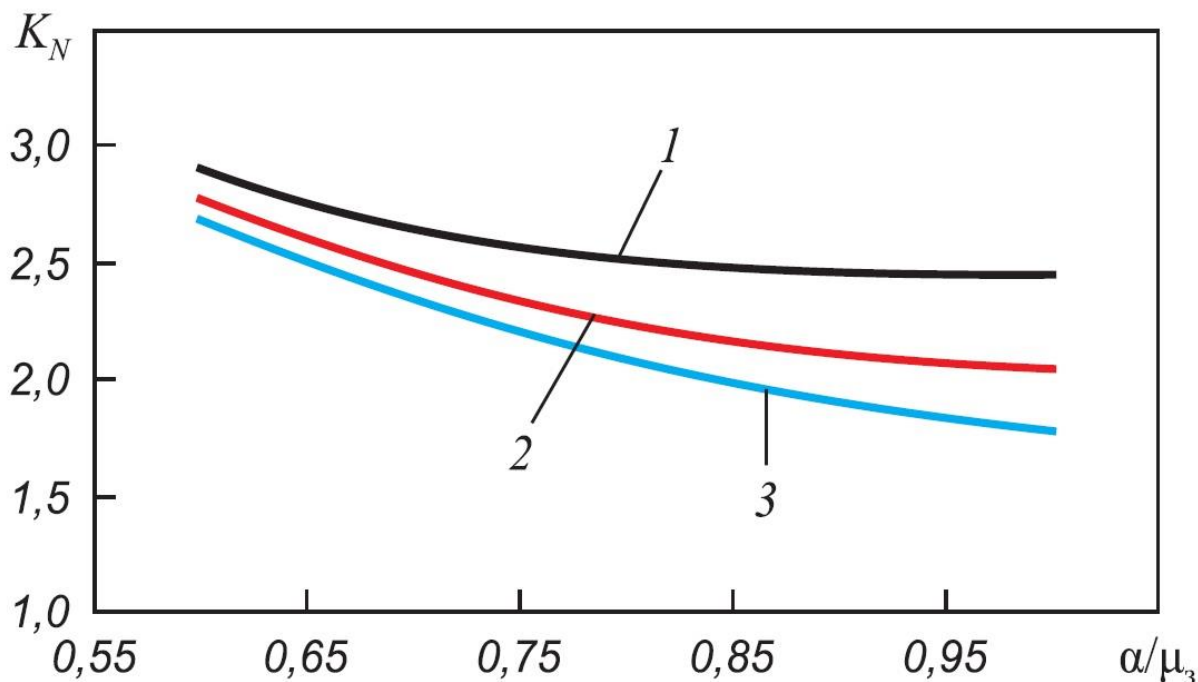


Рисунок 2.1- Влияние отношения  $\alpha/\mu_3$  на показатель возможностей сил трения в очаге деформации  $K_N$  [94]: 1 – прямоугольный калибр  $\mu_3=0,45$ ; 2 – гладкие валки  $\mu_3=0,45$ ; 3 – гладкие валки  $\mu_3=0,25$

Из рисунка 2.1 виден высокий потенциал резерва сил трения на установившейся стадии процесса прокатки, который можно использовать для реализации процесса прокатки – разделения.

Количественному определению резерва сил трения в очаге деформации посвящены работы Фастыковского А.Р [95-99]. При практическом использовании любого из перечисленных выше процессов, использующих резерв сил трения, необходимо выполнение условия:

$$Q_1 \geq Q_2, \quad (2.1)$$

где  $Q_1$  - продольная сила, создаваемая клетью, формирующей сочлененный профиль, за счет использования резерва сил трения, кН;  $Q_2$  – сила, необходимая для продольного разделения неприводным устройством, кН.

Рассмотрим наиболее часто используемые формы калибров для формирования сочлененных профилей [99 – 101] и оценим возможности резерва сил трения.

Установим граничные условия, определяющие взаимодействие деформируемого тела с окружающей средой, которые сводятся к следующим допущениям:

- 1) рассматривается стадия установившегося процесса прокатки;
- 2) на контактной поверхности в очаге деформации действуют нормальные напряжения  $p_{cp} = \sigma_s$  и касательные  $\tau_{cp}$ . При инженерных расчетах нормальное давление ( $p_{cp}$ ) можно заменить сопротивлением деформации ( $\sigma_s$ ). Такой вид замен при получении инженерных формул используется в работах Целикова А.И., Грудева А.П., Выдрина В.Н., Полухина П.И. и других исследователей [85, 87];
- 3) на участке скольжения действует закон трения Кулона – Амонтона, согласно которому  $\tau_{cp} = \mu_y \sigma_s$ ;
- 4) на полосу действует внешняя сила, которая уравновешивается резервом сил трения, создавая равнонаправленное скольжение на контактной поверхности (зона отставания);
- 5) форма заготовки, задаваемой в сочлененный калибр, близка к форме получаемой полосы, что обеспечивает работу всех частей калибра при его заполнении.

Исходя из сформулированных граничных условий рассмотрим простейший случай формирования сочлененного профиля за счет внедрения в плоскую заготовку конических выступов на валках (рисунок 2.2). Запишем уравнения равновесия сил в очаге деформации, спроектировав все действующие силы на направление движения металла:

$$-4 R_k h_z n_{nep} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \int_0^\alpha \sigma_s \sin \theta d\theta + \frac{4 R_k n_{nep} h_z}{\cos \frac{\beta}{2}} \int_0^\alpha \sigma_s \mu_y \cos \theta d\theta - \sigma_1 S = 0, \quad (2.2)$$

где  $h_\Gamma$  – высота гребня, мм;  $\beta$  – угол между сторонами гребня, град;  
 $R_k$  – катающий радиус калибра, мм;  $\alpha$  – угол захвата, рад;  $\sigma_s$  – сопротивление деформации, МПа;  $\mu_y$  – коэффициент трения на установившейся стадии прокатки;  $n_{nep}$  – число перемычек;  $\sigma_1$  – напряжение подпора, Мпа;  $S$  – площадь поперечного сечения сочлененного профиля, мм<sup>2</sup>;  $\theta$  – текущий угол, град.

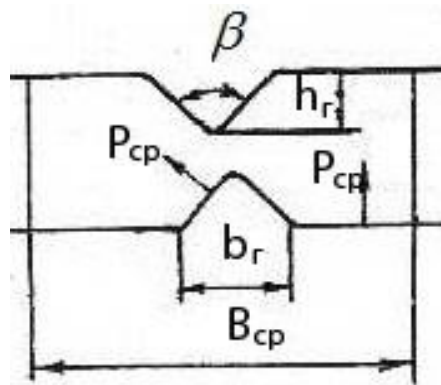


Рисунок 2.2 – Формирование сочлененного профиля выступами на валках

После интегрирования и преобразований получим безразмерную величину - показатель резерва сил трения ( $\sigma_1/\sigma_s$ ). Показатель резерва сил трения является безразмерной величиной, удобной для сопоставления и анализа влияния основных факторов на баланс сил в очаге деформации при прокатке – разделении.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{2l_d h_z n_{nep}}{S \left( 2\mu_y - \alpha \sin \frac{\beta}{2} \right) \cos \frac{\beta}{2}}, \quad (2.3)$$

где  $l_d$  – длина дуги захвата при формировании перемычки, мм.

Оценим величину показателя резерва сил трения при прокатке сочлененной полосы в прямоугольных калибрах (рисунок 2.3).

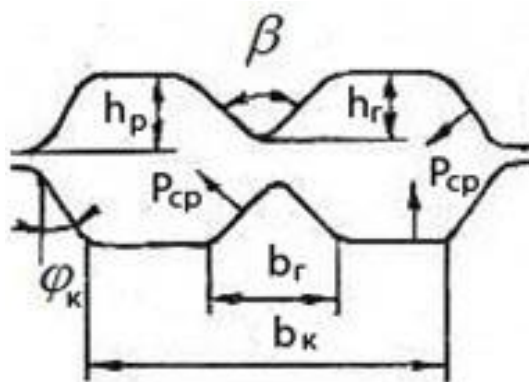


Рисунок 2.3 – Формирование сочлененного профиля в прямоугольных калибрах

Уравнение равновесия сил в очаге деформации при формировании сочлененного профиля в прямоугольных калибрах будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 & R_{\kappa} n (b_{\kappa} - b_{\zeta}) \int_0^{\alpha} \sigma_s \mu_y \cos \theta d\theta - R_{\kappa} n (b_{\kappa} - b_{\zeta}) \int_0^{\alpha} \sigma_s \sin \theta d\theta - \\
 & - 2 R_{\kappa} n h_{\zeta} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \int_0^{\alpha} \sigma_s \sin \theta d\theta + \frac{2 R_{\kappa} n h_{\zeta}}{\cos \frac{\beta}{2}} \int_0^{\alpha} \sigma_s \mu_y \cos \theta d\theta - \\
 & - 2 R_{\kappa} n h_p \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \int_0^{\alpha} \sigma_s \sin \theta d\theta + \frac{2 R_{\kappa} n h_p}{\cos \frac{\beta}{2}} \int_0^{\alpha} \sigma_s \mu_y \cos \theta d\theta - \sigma_1 S = 0,
 \end{aligned} \quad (2.4)$$

где  $b_r$  – ширина гребня (выступа), мм;  $b_{\kappa}$  – ширина полосы, мм;  $h_p$  – высота ручья, мм;  $n$  – число сочлененных профилей;  $\beta$  – угол между сторонами гребня, град.

С учетом зазора между валками и небольшой толщины перемычки приравняем  $h_{\zeta} = h_p$  и после интегрирования и преобразований получим зависимость для определения показателя резерва сил трения вида:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{l_d n}{S} \left[ (b_{\kappa} - b_{\zeta}) (\mu_y - 0,5) - \alpha h_{\zeta} \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + \frac{2 h_{\zeta} \mu_y}{\cos \frac{\beta}{2}} \left( 1 + \frac{2}{n} \right) \right]. \quad (2.5)$$

При разделении сдвоенного сочлененного профиля зависимость упрощается до вида:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{2l_d}{S} \left[ (b_k - b_z)(\mu_y - 0,5) - \frac{1,5h_z}{\cos \frac{\beta}{2}} \left( \alpha \sin \frac{\beta}{2} - 2,7\mu_y \right) \right]. \quad (2.6)$$

Рассмотрим формирование сочлененной полосы в квадратных калибрах (рисунок 2.4). Запишем уравнение равновесия сил в очаге деформации для калибра, состоящего из  $n$  сочлененных квадратных профилей:

$$-2\sigma_s R_k n h_p \operatorname{tg} \frac{\omega}{2} \int_0^\alpha \sin \theta d\theta + \frac{2\sigma_s \mu_y n h_p}{\cos \frac{\omega}{2}} \int_0^\alpha \cos \theta d\theta - \sigma_1 S = 0, \quad (2.7)$$

где  $\omega$  – угол при вершине квадрата, град.

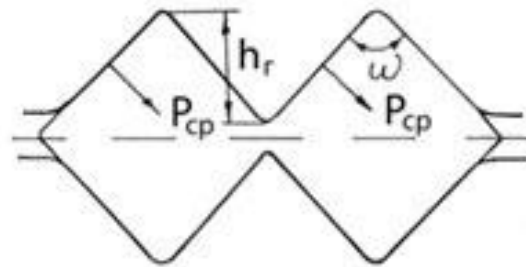


Рисунок 2.4 – Сочлененные квадратные калибры

После интегрирования и преобразований получим:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{h_p n l_d}{S} (2,8\mu_y - \alpha). \quad (2.8)$$

Пренебрегая зазором между валками, который в этих калибрах обычно не превышает 1 – 2 мм и рассматривая формирование сдвоенных сочлененных профилей, получим:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{l_d}{2h_p} (2,8\mu_y - \alpha). \quad (2.9)$$

Рассмотрим формирование сочлененной полосы с использованием круглых калибров (рисунок 2.5). Запишем уравнение равновесия сил в очаге деформации для калибра, формирующего несколько сочлененных кругов, спроектировав все силы на направление прокатки:

$$-\pi\sigma_s R_k r_n n \int_0^{90} \int_0^\alpha \sin \beta \sin \theta d\beta d\theta + \pi\sigma_s \mu_y R_k r_n n \int_0^\alpha \cos \theta d\theta - \sigma_1 S = 0, \quad (2.10)$$

где  $r_n$  – радиус сочлененных кругов;  $\beta$  – текущий угол.

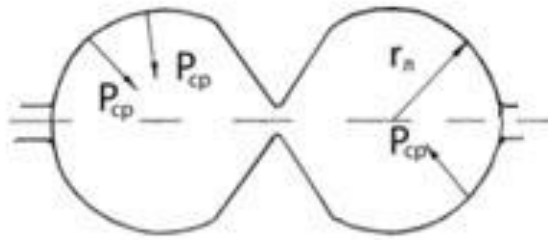


Рисунок 2.5 – Калибр, состоящий из сочлененных кругов.

После интегрирования и преобразований получим для сочлененных кругов:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{l_d n}{2 r_n} (2 \mu_y - \alpha). \quad (2.11)$$

Используя величины резерва сил трения при формировании сочлененных профилей, можно определить величину максимального напряжения подпора  $\sigma_1$  и максимальное значение продольной силы  $Q_1$ , обеспеченной резервом сил трения:

$$Q_1 = \sigma_1 S. \quad (2.12)$$

Количественные значения напряжения подпора ( $\sigma_1$ ), продольной силы ( $Q_1$ ), определенные по полученным теоретическим зависимостям для различных форм сочлененных калибров, необходимы для определения возможности последующего разделения сочлененного профиля в неприводном делительном устройстве.

## 2.2 Условия продольного разделения передавливанием и разрывом с использованием неприводного делительного устройства

Возможность реализации способа прокатки-разделения с использованием неприводных делительных устройств зависит от величин продольных

сил, действующих со стороны клетки, формирующей окончательный сочлененный профиль, и реактивной силы со стороны делительного устройства. Величина продольной силы, обеспеченная резервом сил трения в очаге деформации клетки, формирующей сочлененный профиль, рассмотрена в предыдущем разделе с учетом основных факторов, на нее влияющих. Продольная сила, необходимая для разделения неприводным делительным устройством, изучена недостаточно. Немногочисленные труды С.М. Жучкова, Г.М. Шульгина, Л.В. Кулакова, А.Н. Бондаренко, А.П. Лохматова и других [10, 25, 29, 30, 31, 76] исследователей посвящены в основном экспериментальным исследованиям. Такое положение затрудняет широкое промышленное внедрение технологии прокатки-разделения с использованием неприводных делительных устройств. Известные способы разделения неприводными делительными устройствами недостаточно изучены в теоретическом и экспериментальном плане, имеют ограниченную область использования (только между клетями в непрерывных группах), небольшой выбор способов разделения: разделение разрывом и реже передавливанием соединительной перемычки между сочлененными профилями. Ввиду искажения формы профиля после разделения, образования в месте раздела заусенца, существенно ограничивается сортамент готовой продукции.

Внедрение технологии прокатки – разделения на действующих предприятиях, поиск рациональных режимов формоизменения и разделения в неприводных делительных устройствах решается методом проб и ошибок. Используемые технические и технологические разработки индивидуальны, не поддаются тиражированию на действующих прокатных станах. Исправить создавшуюся ситуацию можно, разработав теоретические зависимости, описывающие как процесс формирования сочлененных профилей различной формы, так и условия разделения неприводным устройством известными способами.

Вначале рассмотрим способ разделения передавливанием. Этот способ во многом похож на способ прокатки. Усилие, действующее на делительный

ролик при передавливании перемычки, можно найти по известной формуле [85]:

$$P_{nep} = \sigma_s F_{nep}, \quad (2.13)$$

где  $F_{nep}$  – площадь контакта при передавливании, мм<sup>2</sup>.

$$F_{nep} = \frac{b_0 \sqrt{\Delta h \cdot r_p}}{2}, \quad (2.14)$$

где  $b_0$  – начальная ширина в зоне передавливания, мм;  $r_p$  – радиус делительного ролика, мм.

Используя величину усилия передавливания, можно найти необходимую при разделении продольную силу с учетом числа одновременно разделяемых перемычек:

$$Q_{nep} = 2 n_{nep} P_{nep} \operatorname{tg} \frac{\alpha_{nep}}{2}, \quad (2.15)$$

где  $\alpha_{nep}$  – угол захвата при передавливании перемычки, град;  $n_{nep}$  – число разделяемых перемычек.

Для определения площади контакта при передавливании необходимо знать ширину в зоне передавливания ( $b_0$ ). На ширину в зоне передавливания влияют толщина перемычки ( $h_{nep}$ ) и углы между сочлененными профилями ( $\beta$ ), при вершине делительного ролика ( $\omega_p$ ) (рисунок 2.6). Начальную ширину в зоне передавливания можно найти по формуле:

$$b_0 = 2 h_s \operatorname{tg} \frac{\omega_p}{2}, \quad (2.16)$$

где  $h_s$  – высота перекрытия, мм.

Высоту перекрытия можно определить по формуле:

$$h_s = \frac{h_{nep} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{2 \left( \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} - \operatorname{tg} \frac{\omega_p}{2} \right)}. \quad (2.17)$$

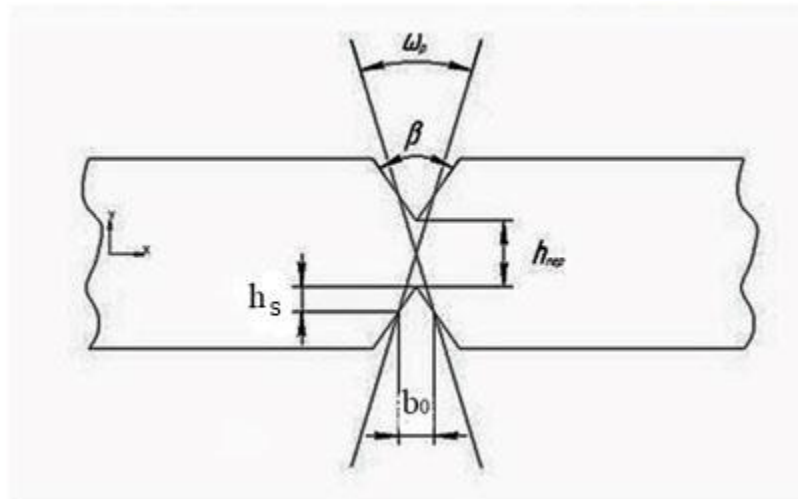


Рисунок 2.6 – Разделение передавливанием

Подставим соответствующие величины в зависимость (2.15). Угол захвата при передавливании перемычки не превышает несколько градусов, это дает основание упростить зависимость (2.15) с учетом  $tg \frac{\alpha_{nep}}{2} \approx \frac{\alpha_{nep}}{2}$ . Согласно данным литературы [102] при таком упрощении ошибка не превышает 2-3%:

$$Q_{nep} = h_s (h_s + h_{nep}) n_{nep} \sigma_s tg \frac{\omega_p}{2} = Q_2. \quad (2.18)$$

Используя полученную зависимость, можно определить усилие, действующее на делительный ролик и продольную силу, необходимую для разделения. Очевидно, что чем больше разница углов между сочлененными профилями и углом при вершине ролика, тем меньше усилие на ролик и продольная сила, необходимая для разделения. Однако большая разница углов усложнит центрирование ролика относительно места раздела, сократит срок службы делительного ролика. Исходя из аргументов, приведенных выше, следует рекомендовать величину отношения углов при вершине делительного ролика и между сочлененными профилями выдерживать в пределах 0,6 – 0,75.

Следующим этапом определим условия разделения сочлененных профилей разрывом. В отличие от передавливания при разделении разрывом

угол при вершине делительного ролика больше, чем угол в месте сочленения и разделение осуществляется за счет сил, действующих на боковой поверхности делительного ролика. Делительный ролик действует при разрыве разрывом как клин с углом при вершине  $\gamma_k$  (рисунок 2.7). Определить  $\gamma_k$  можно по формуле:

$$\gamma_k = 2 \arctg \left( \frac{\operatorname{tg} \frac{\omega_p}{2}}{\sqrt{\frac{D_p}{K_p} - 1}} \right); \quad (2.19)$$

$$K_p = \frac{b^2}{2 \operatorname{tg} \frac{\omega_p}{2}}, \quad (2.20)$$

где  $b_r$  – ширина между гребнями сочлененного профиля, мм;  $D_p$  – диаметр делительного ролика, мм.

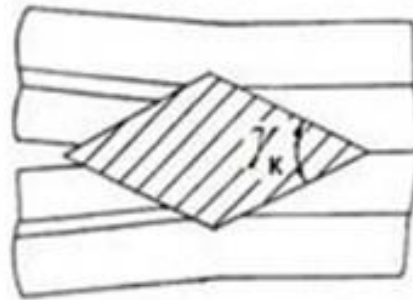


Рисунок 2.7 – Схема разделения разрывом

При разрыве перемычки необходимо преодолеть две силы: силу, затрачиваемую на разрыв ( $P_{разр}$ ), и силу для разведения разделяемых частей сочлененного профиля изгибом ( $P_{изг}$ ). Рассмотрим силу, затрачиваемую на разрыв, с учетом количества разделяемых перемычек.

$$P_{разр} = n_{пер} F_{разр} \sigma_s, \quad (2.21)$$

где  $F_{разр}$  – площадь разрыва,  $\text{мм}^2$ .

При разделении перемычки металл находится в горячем состоянии при температуре 1000 - 1100<sup>0</sup>С. В этих условиях металл пластичный, и деформация будет сосредоточена в месте перемычки, и площадь участка, где проис-

ходит разрыв будет иметь треугольную форму, как это показано на рисунке 2.8. Площадь участка, где происходит разрыв, можно найти по формуле:

$$F_{разр} = \frac{h_{неп} l_{разр}}{2}, \quad (2.22)$$

где  $l_{разр}$  - длина зоны разрыва, мм.

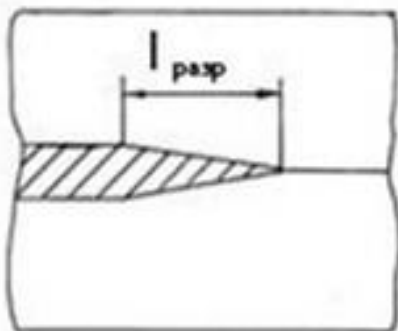


Рисунок 2.8 – Площадь участка разрыва

Как было отмечено выше, при разделении перемычки разрывом вся деформация будет сосредоточена в этой области. Металл при уменьшении толщины перемычки будет перераспределяться на увеличение ширины, исходя из этого, можно определить длину зоны разрыва по формуле:

$$l_{разр} = \frac{h_{неп}}{2 \operatorname{tg} \frac{\gamma_{\kappa}}{2}}. \quad (2.23)$$

Подставив в формулу (2.20) соответствующие величины, определим усилие разрыва.

При разделении сочлененных профилей разрывом части сочлененного профиля разводятся в стороны, что вызывает необходимость приложения дополнительного усилия ( $P_{узг}$ ).

$$P_{узг} = \frac{W_{пл.узг} \sigma_s}{l_{узг}}, \quad (2.24)$$

где  $W_{пл.узг}$  – момент сопротивления при пластическом изгибе,  $\text{мм}^3$ ;  $l_{узг}$  – плечо приложения изгибающей силы, мм.

При определении величины плеча приложения изгибающей силы необходимо учитывать геометрические параметры делительного ролика, глубину внедрения ролика  $K_p$  и размеры сочлененного профиля. Исходя из оговоренных параметров, плечо приложения изгибающей силы можно найти по формуле:

$$l_{usz} = \sqrt{K_p(D_p - K_p)} - \frac{b_z}{2 \cos \frac{\gamma_k}{2}} \quad (2.25)$$

Величина продольной силы, используемой при разрыве, с учетом числа разделяемых перемычек определяется по формуле:

$$Q_{разр} = 2(P_{разр} + P_{usz}) \operatorname{tg} \frac{\gamma_k}{2} = Q_2 \quad (2.26)$$

### **2.3 Определение продольной устойчивости полосы при прокатке-разделении с использованием неприводного делительного устройства**

Особенность изучаемого процесса прокатки-разделения заключается в том, что процесс реализуется в две стадии: вначале формируется сочлененный профиль в прокатных валках, затем осуществляется продольное разделение неприводным делительным устройством, расположенным на некотором расстоянии от очага деформации. Разделение происходит за счет действия подпирющей силы со стороны прокатной клетки, формирующей сочлененный профиль. Величина продольной силы необходимой для разделения, изменяется в широких пределах и может создать условия потери продольной устойчивости полосы в промежутке очаг деформации - неприводное делительное устройство. При определении допустимого расстояния между очагом деформации и делительным устройством, обеспечивающего продольную устойчивость, воспользуемся формулой Эйлера (формула для оценки устойчивости колонн) [103-105].

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EJ_{min}}{(kl)^2}, \quad (2.27)$$

где  $E$  – модуль упругости первого рода, МПа;  $J_{min}$  – минимальный момент инерции сечения, мм<sup>4</sup>;  $k$  – коэффициент приведения длины;  $l$  – защемленная длина, мм.

В зависимость (2.27) вместо критической силы подставим продольную силу, необходимую при разделении сочлененного профиля.

$$Q_2 = \frac{\pi^2 EJ_{min}}{(kl)^2}. \quad (2.28)$$

После преобразований (2.28) получим формулу, по которой можно определить допустимое расстояние, обеспечивающее продольную устойчивость в промежутке между клетью, формирующей сочлененный профиль и делительным устройством:

$$l_{доп} = \frac{\pi \sqrt{EJ_{min}}}{k \sqrt{Q_2}}. \quad (2.29)$$

Зависимость для определения допустимого расстояния, обеспечивающего продольную устойчивость сочлененных круглых калибров:

$$l_{доп} = \frac{3,6 r_x^2 \sqrt{E}}{k \sqrt{Q_2}}. \quad (2.30)$$

Зависимость для определения допустимого расстояния, обеспечивающего продольную устойчивость сочлененных квадратных калибров:

$$l_{доп} = \frac{0,46 h_k^2 \sqrt{E}}{k \sqrt{Q_2}}. \quad (2.31)$$

где  $h_k$  – высота калибра, мм.

Зависимость для определения допустимого расстояния, обеспечивающего продольную устойчивость сочлененных прямоугольных калибров:

$$l_{доп} = \frac{0,9 h_k \sqrt{E b_k h_k}}{k \sqrt{Q_2}}. \quad (2.32)$$

Полученные зависимости позволяют количественно оценить величину допустимого расстояния, между клетью, формирующей сочлененный профиль, и делительным устройством, гарантирующего продольную устойчивость полосы. Однако перед тем, как пользоваться полученными зависимостями, необходимо уточнить величину коэффициента приведения длины с учетом заземления в валках клетки и неприводных делительных роликах. Экспериментальное изучение этого вопроса будет рассмотрено в следующей главе.

Рассмотренный в главе материал опубликован в работах [106-108].

## **Выводы**

1. Получены теоретические зависимости для определения продольной силы, обеспеченной резервом сил трения при формировании сочлененных прямоугольных, квадратных, круглых профилей, учитывающие размер и форму калибров, условия трения в очаге деформации прокатной клетки, сопротивление деформации материала.

2. Предложены теоретические зависимости для оценки величины продольной силы, необходимой для разделения сочлененных профилей передавливанием и разрывом, учитывающие форму сочлененного профиля, конструктивные особенности неприводных делительных роликов, механические свойства разделяемого материала.

3. Используя известную формулу Эйлера для определения устойчивости колонн, получены зависимости, позволяющие оценить допустимое расстояние между клетью, формирующей сочлененный профиль, и неприводным делительным устройством, гарантирующее продольную устойчивость полосы.

### **3. Изучение процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного устройства**

#### **3.1 Методика проведения экспериментов**

##### **3.1.1 Методика замера продольной силы, обеспеченной резервом трения в очаге деформации клетки, формирующей сочлененный профиль**

Процесс прокатки-разделения с использованием неприводного делительного устройства осуществляется за счет продольного усилия, обеспеченного резервом сил трения клетью, формирующей окончательный сочлененный профиль. Продольное усилие обусловлено наличием резерва сил трения на установившейся стадии процесса прокатки. Величина резерва сил трения зависит от геометрии калибров, условий деформации, материала заготовки и т.д. Информация о величине резерва сил трения в клетке, формирующей окончательный сочлененный профиль, необходима для оценки возможности стабильного процесса продольного разделения в неприводном устройстве.

Эксперименты по определению величины продольной силы, обеспеченной резервом сил трения в очаге деформации, формирующей сочлененный профиль, изучали на лабораторном стане с диаметром валков 145 мм. В качестве материала для образцов использовали чистый свинец. Предварительно изготавливали сочлененный образец, который прокатывали за один проход в калибрах разной формы и с разными обжатиями до размеров готового к разделению профиля. Для прокатки использовали составные валки (рисунок 3.1) со сменными шайбами, на которых нарезали соответствующие сочлененные калибры (рисунок 3.2).

Для определения величины продольной силы, обеспеченной резервом сил трения в очаге деформации клетки, формирующей окончательный сочлененный профиль, была разработана конструкция силоизмерителя на базе образцового динамометра ДОСМ-3, рассчитанного на максимальное усилие

30кН, и месдозы с возможностью записи результатов. Данная конструкция позволяет получить стабильные данные с возможностью проверки, записи и последующей компьютерной обработкой. На начальном этапе при выборе методики определения продольной силы рассматривались два варианта замеров:

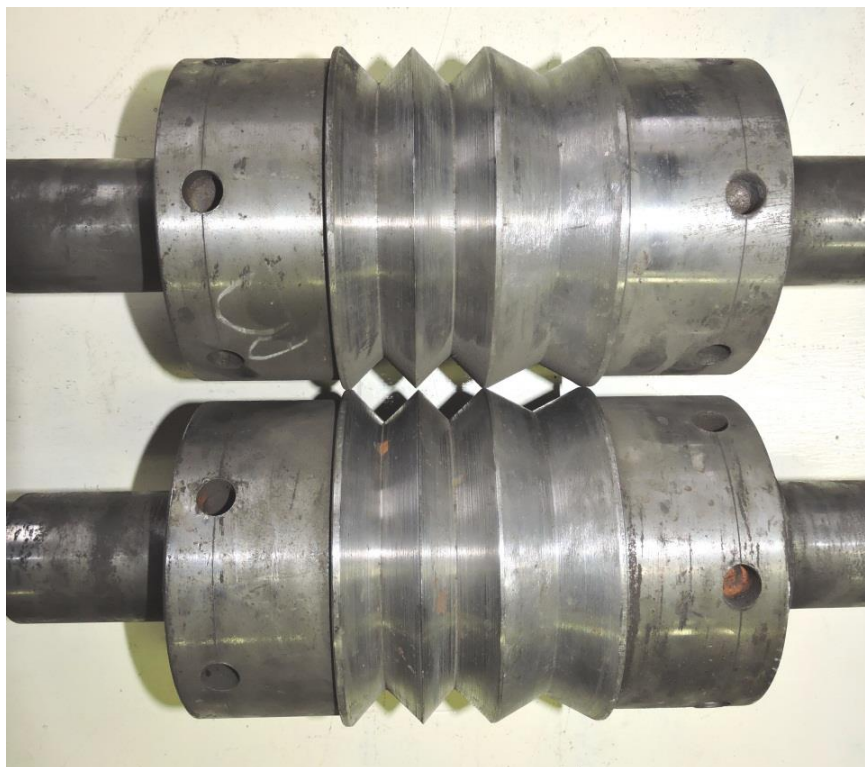


Рисунок 3.1 – Составные валки

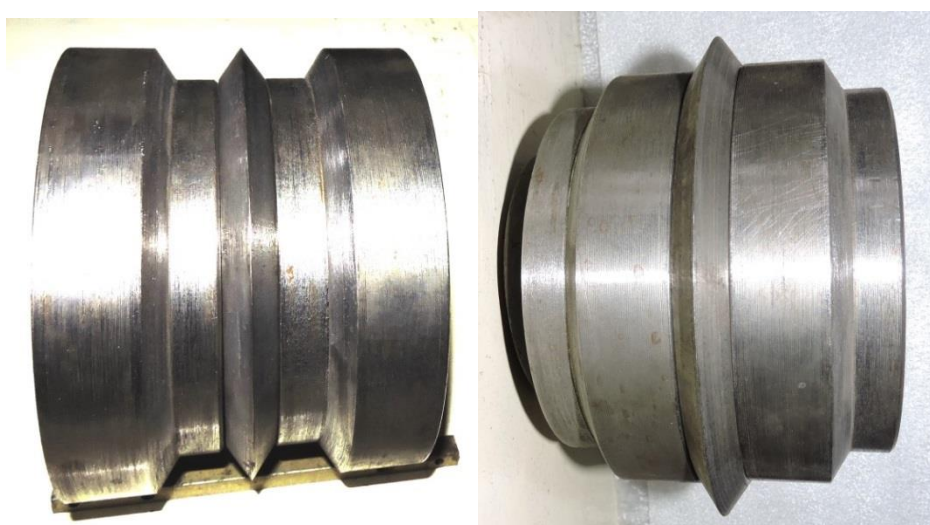


Рисунок 3.2 – Сменные шайбы для формирования сочлененного профиля

1. Классический с использованием мездозы (рисунок 3.3), усилителя и электронного двухканального самописца VM8020 с выводом результатов на экран ноутбука и последующей обработкой результатов в программном комплексе самописца VM8020 (рисунок 3.4) [109, 110].

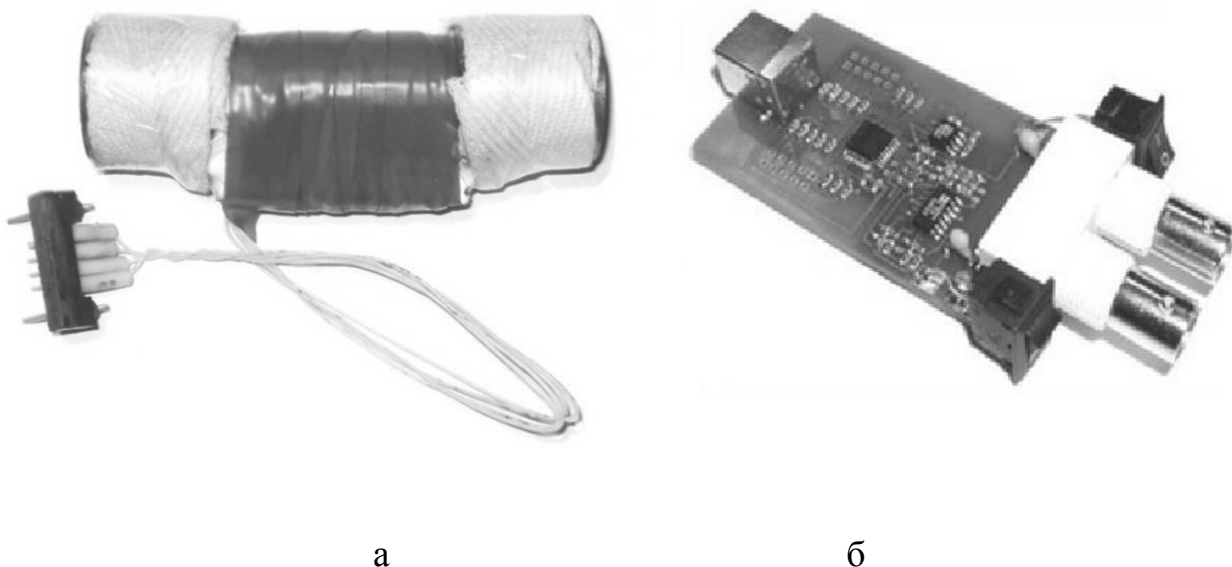


Рисунок 3.3 – Составные части силоизмерителя

а) силоизмеритель (мездоза); б) двухканальный самописец VM8020

Двухканальный самописец VM8020 имеет программное обеспечение, позволяющее сглаживать помехи, непрерывно записывать информацию по двум независимым каналам в течение 24 часов. Имеется блок статистической обработки информации. В качестве записывающего устройства может использоваться стационарный компьютер или ноутбук.

2. Конструкция, где в качестве силоизмерителя используется образцовый динамометр ДОСМ-3, показана на рисунке 3.5.

Изучение возможностей обоих способов определения продольной силы показало их преимущества и недостатки. Для получения стабильных надежных результатов с возможностью записи и компьютерной обработки данных было принято решение о совместном их использовании при изучении продольной силы, обеспеченной резервом сил трения при формировании сочлененного профиля.

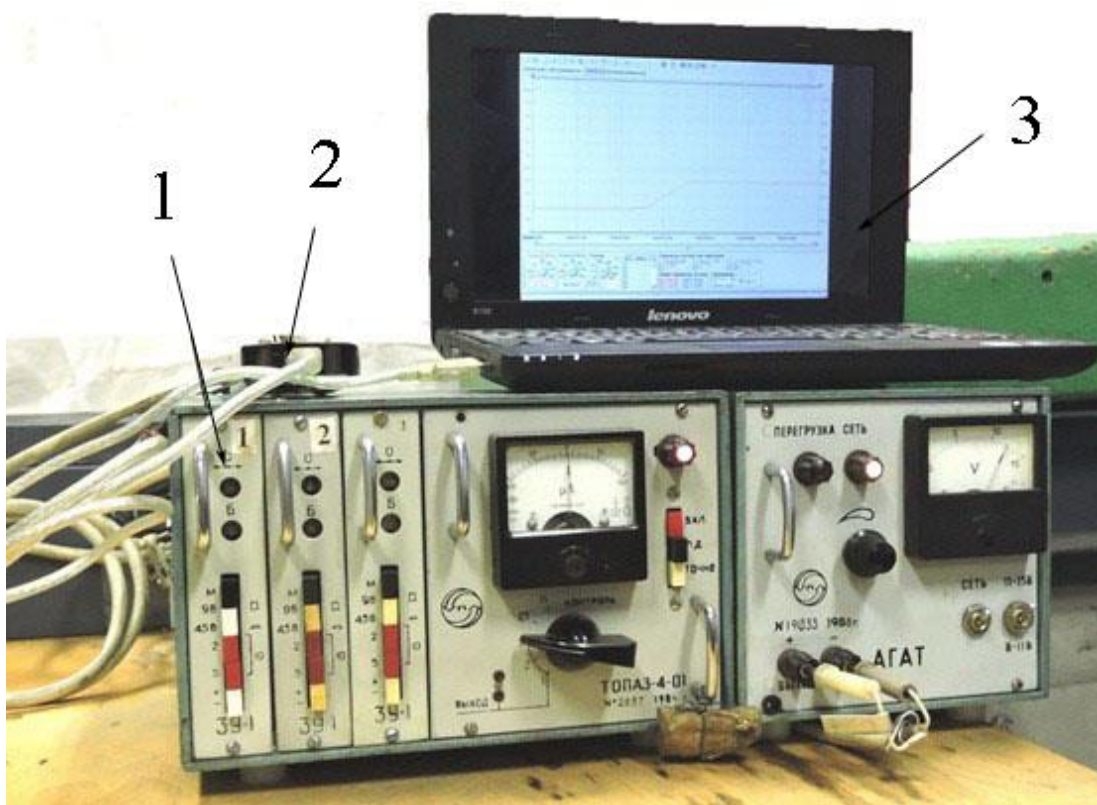


Рисунок 3.4 – Приборы для замера усилия: 1 – усилитель Топаз-4 с блоком питания Агат; 2 – двухканальный самописец ВМ8020; 3 - ноутбук

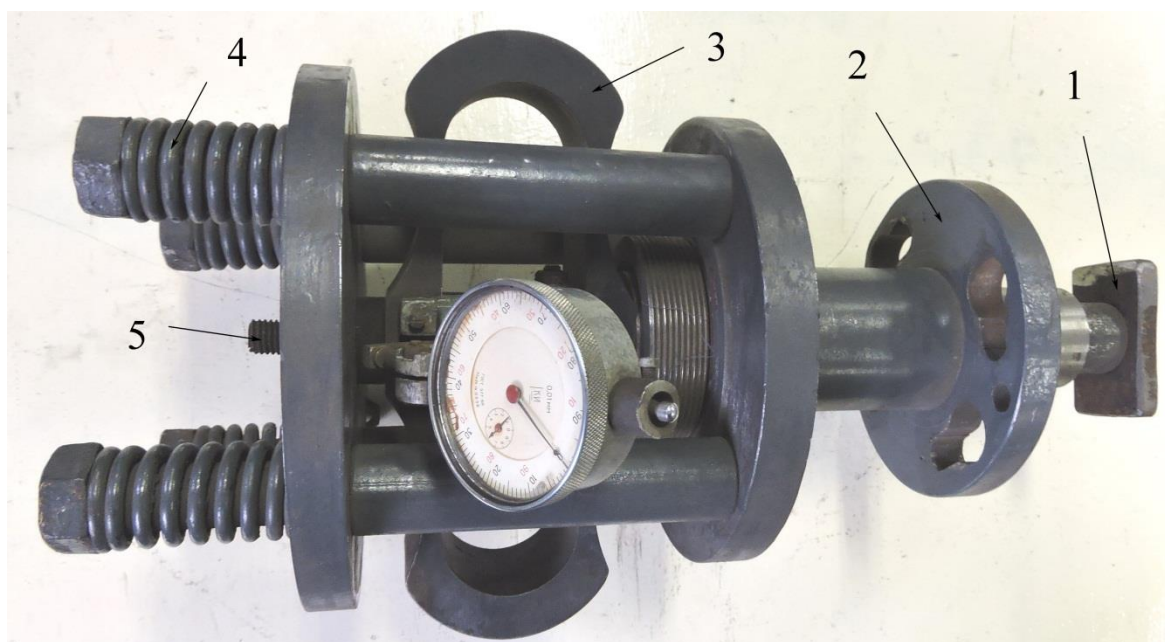


Рисунок 3.5 – Конструкция разработанного силоизмерителя

Рассмотрим подробнее конструкцию устройства для замера продольной **силы**, приведенной на рисунке 3.5. Силоизмеритель состоит из толкате-

ля 1, корпуса 2, внутри которого между толкателем и динамометром устанавливалась месдоза (рисунок 3.3), образцового динамометра 3, компенсационных пружин 4, регулировочного болта 5. Замер продольного усилия осуществляется следующим образом: после заполнения очага деформации передний конец образца через толкатель передают продольное усилие на месдозу и динамометр. Компенсационные пружины 4 обеспечивают плавность увеличения нагрузки до максимального значения, приводящего к пробуксовке валков. Изменение продольной силы, обеспеченной резервом сил трения, регистрировалось месдозой и записывалось в память компьютера с возможностью дальнейшей обработки, и дополнительно максимальное значение фиксировалось часовым индикатором динамометра. Крепится силоизмеритель к лабораторной клетке при помощи приспособлений, показанных на рисунке 3.6.

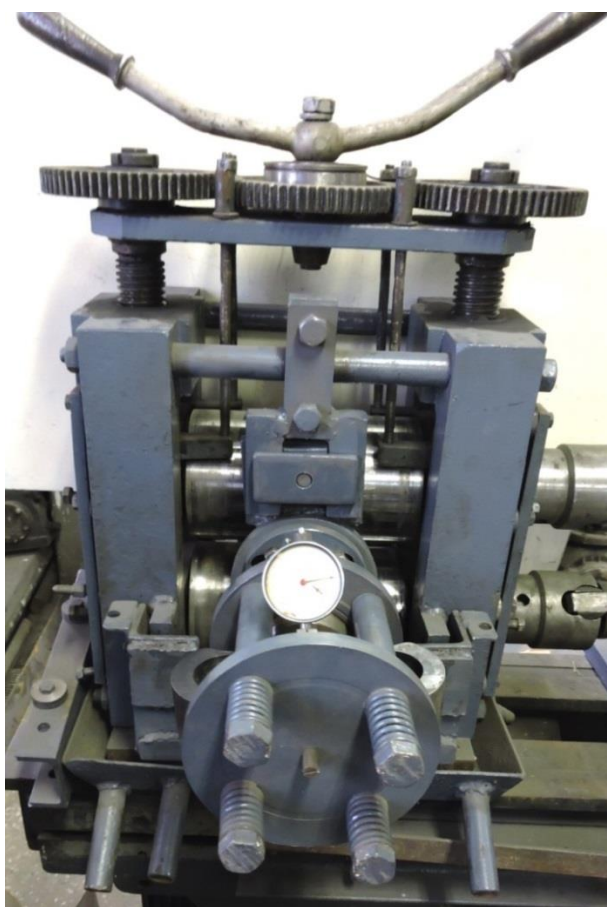


Рисунок 3.6 – Установка для замера продольного усилия при прокатке сочлененного профиля

### **3.1.2 Установка для определения усилия, необходимого при продольном разделении передавливанием и разрывом**

Вторая составляющая, необходимая для оценки возможности процесса прокатки-разделения, это продольная сила, применяемая для разделения сочлененного профиля неприводным делительным устройством. Продольная сила, используемая при разделении неприводным делительным устройством, зависит от многих факторов: толщины перемычки сочлененного профиля, способа разделения, геометрических параметров делительных устройств и т.д. Информация по величине продольной силы, позволяющей разделить сочлененный профиль, крайне важна при оценке области осуществимости процесса прокатки-разделения и выбора рациональных параметров делительного инструмента в зависимости от способа разделения и формы сочлененного профиля.

Процесс продольного разделения различных сочлененных профилей неприводным устройством изучался в лабораторных условиях. Разработана установка, предназначенная для изучения влияния на усилие продольного разделения формы делительного ролика, толщины перемычки и способа разделения. Экспериментально рассмотрены способы разделения – разрыв, передавливание. При проведении лабораторных экспериментов использовали чистый свинец, из которого прокаткой получали сочлененные квадраты со стороной 18 мм и разной толщиной перемычки (рисунок 3.7). Толщина перемычки варьировалась от 0,14 до 0,31 высоты калибра, согласно рекомендациям, известным из литературы [111–113], что составляло от 3 до 7 мм. Такие размеры образцов соответствуют параметрам сочлененных профилей, прокатываемых на мелкосортных станах.

Для изучения закономерностей продольного разделения неприводными роликами способами передавливания и разрыва создана лабораторная установка. Конфигурация делительных роликов (см. рисунок 3.8), их размеры, углы при вершине выбирались исходя из практики их применения на дей-

ствующем производстве. Делительные ролики устанавливались в подшипники качения, углы при вершине изменялись от  $70^{\circ}$  до  $120^{\circ}$ .

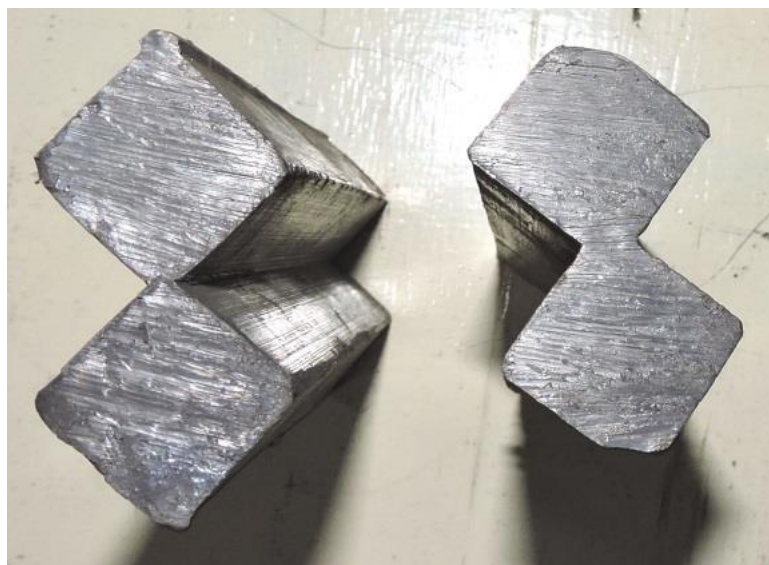
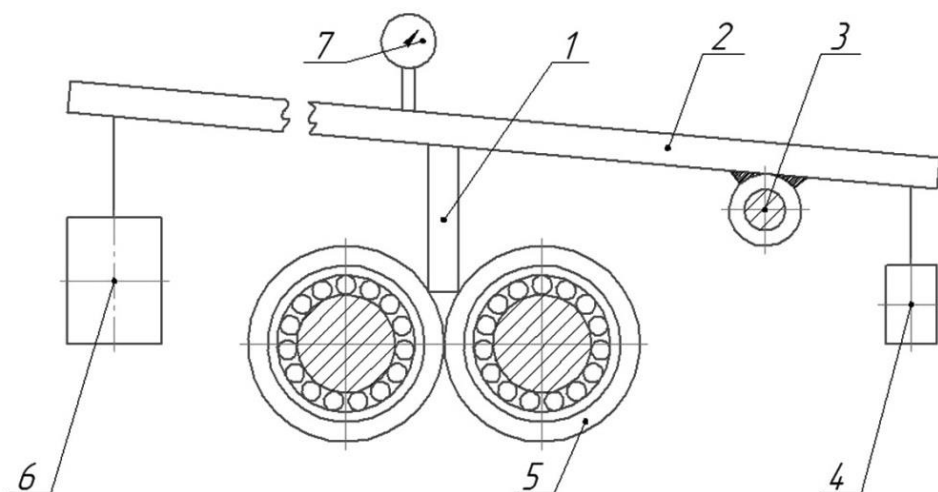


Рисунок 3.7 – Сочлененные образцы

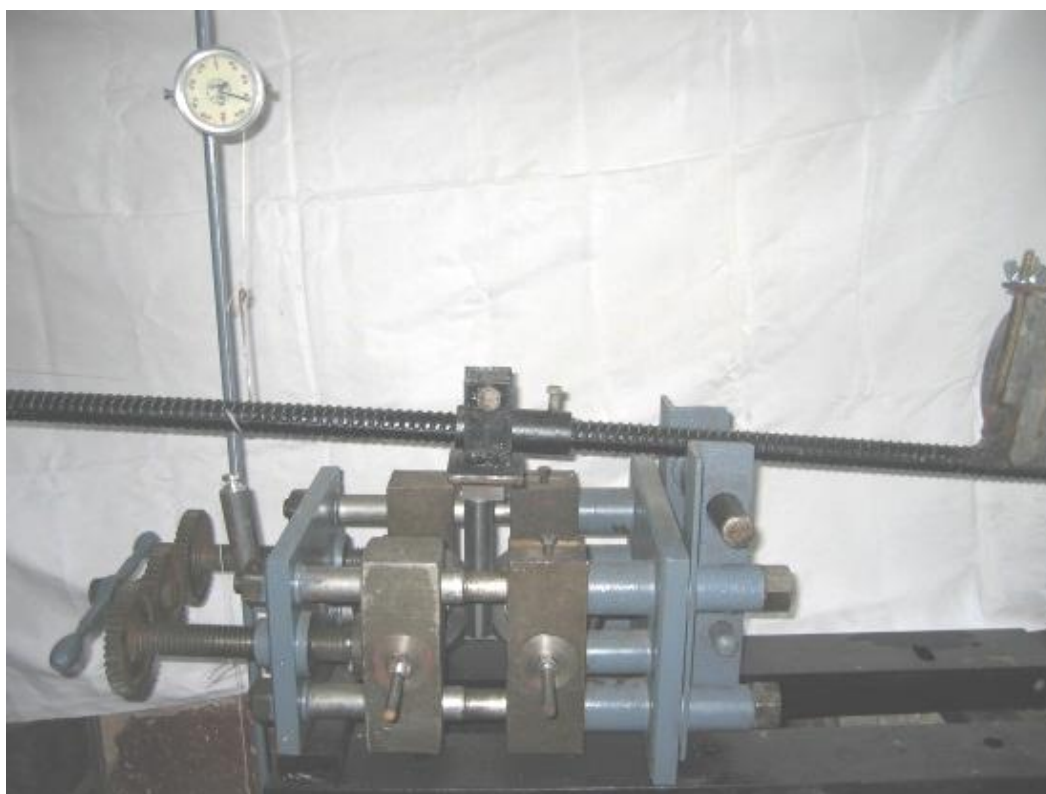


Рисунок 3.8 – Делительные ролики

Лабораторная установка для изучения продольного разделения, кассета с делительными роликами приведены на рисунках 3.9, 3.10.



а



б

1 – сочлененный образец; 2 – рычаг для приложения нагрузки; 3 – ось; 4 – контр груз; 5 – кассета с роликами; 6 – груз; 7 – датчик движения

Рисунок 3.9 – Установка для изучения величины продольной силы, необходимой при разделении сочлененного профиля: а – схема установки; б – общий вид

Для нагружения образца продольным усилием в установке использован рычаг с грузом. Отношение плеч рычага составляло 1:3,7. Исследования проводятся следующим образом. Сочлененные образцы с разной толщиной перемычки, которая варьировалась от 3 до 7 мм с шагом 1 мм, размещались перпендикулярно кассете с делительными роликами. Имеющаяся на рычаге площадка входила в контакт с торцевой поверхностью образца. Используя грузы разного веса, подбиралось необходимое усилие для продольного разделения сочлененного образца. Начало процесса разделения фиксируется датчиком движения в виде часового индикатора, стрелка которого должна была вращаться, равномерно с постоянной скоростью 5,4 мм/с. Усилие, необходимое при разделении, определялось с учетом веса грузов и соотношения плеч рычага. Для регулирования расстояния между делительными роликами установка снабжена нажимным механизмом. Разной конфигурации делительные ролики устанавливались на ось с подшипником.

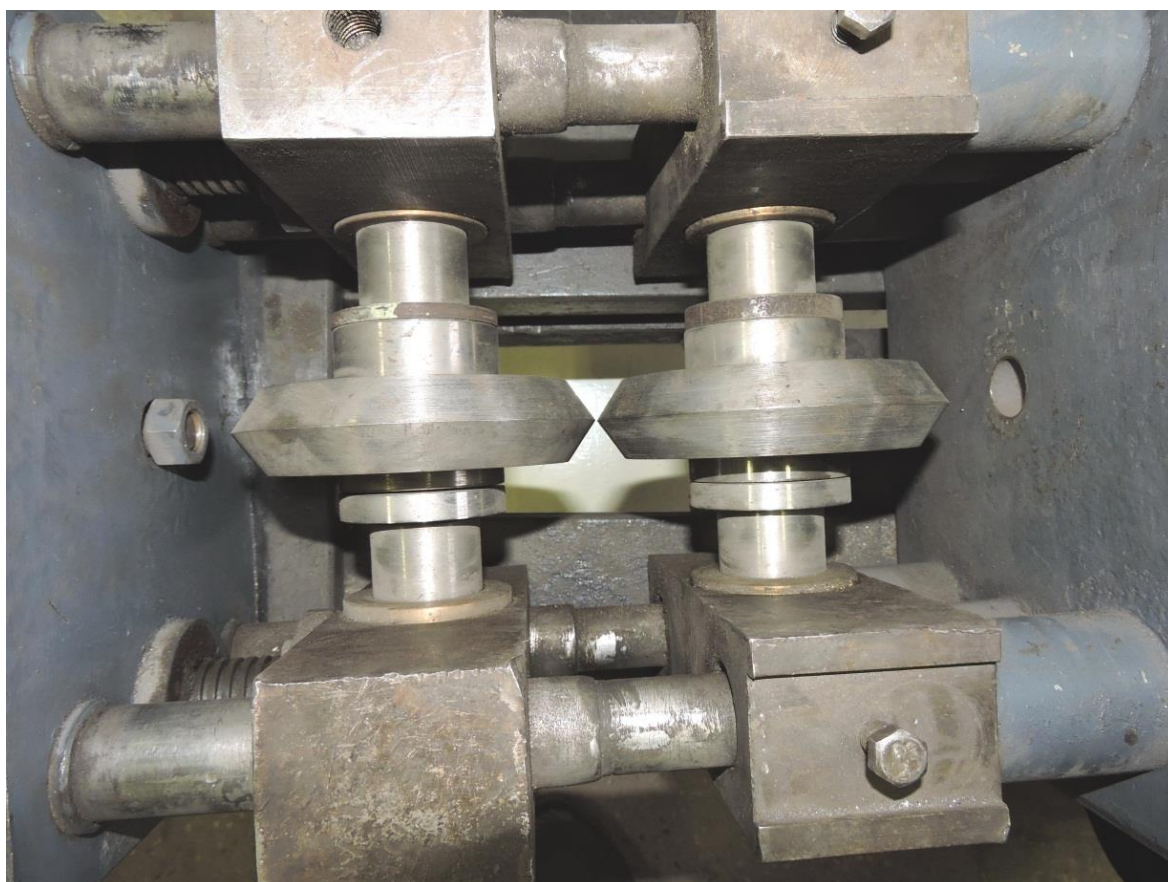


Рисунок 3.10 – Кассета с неприводными делительными роликами для изучения процесса продольного разделения

Экспериментальные данные обрабатывали с использованием методов математической статистики: определяли необходимое число параллельных опытов, доверительные интервалы по методикам, рекомендованным в литературе [114, 115].

## **3.2 Анализ экспериментальных и теоретических результатов исследования процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного устройства**

### **3.2.1 Исследование продольной силы, обеспеченной резервом сил трения при формировании сочлененного профиля**

С целью проверки полученных теоретических зависимостей и изучения факторов, влияющих на величину продольной силы, обусловленной наличием резерва сил трения в очаге деформации при формировании сочлененного профиля, были проведены эксперименты. Величина продольной силы, создаваемой при прокатке сочлененного профиля, определялась в лабораторных условиях с использованием установки, описанной в предыдущем разделе.

На первом этапе исследований изучали прокатку сочлененного профиля в гладких валках с выступом и в сдвоенном прямоугольном калибре (рисунки 3.11). В экспериментах использовали свинцовые образцы высотой 25 мм, шириной 50 мм, в средней части с верхней и нижней стороны выполнены углубления 7,5 мм. Образцы прокатывали за один проход с углами захвата 0,124, 0,215, 0,277, 0,303 рад, что позволило смоделировать формирование сочлененных профилей в чистовых клетях среднесортных станов и промежуточных и чистовых клетях мелкосортных станов. Для получения объективной экспериментальной информации по каждому исследуемому режиму проводилось по пять параллельных опытов с последующим определением дове-



Проведенные исследования позволили определить влияние угла захвата и формы валков на величину продольной силы, обеспеченной резервом сил трения в очаге деформации. Так, увеличение угла захвата приводит к увеличению продольной силы, что можно объяснить увеличением активной площади очага деформации и, соответственно, резерва сил трения. В исследуемом диапазоне величина продольной силы изменилась с 6,9 кН до 14,45 кН при прокатке в сочлененных прямоугольных калибрах.

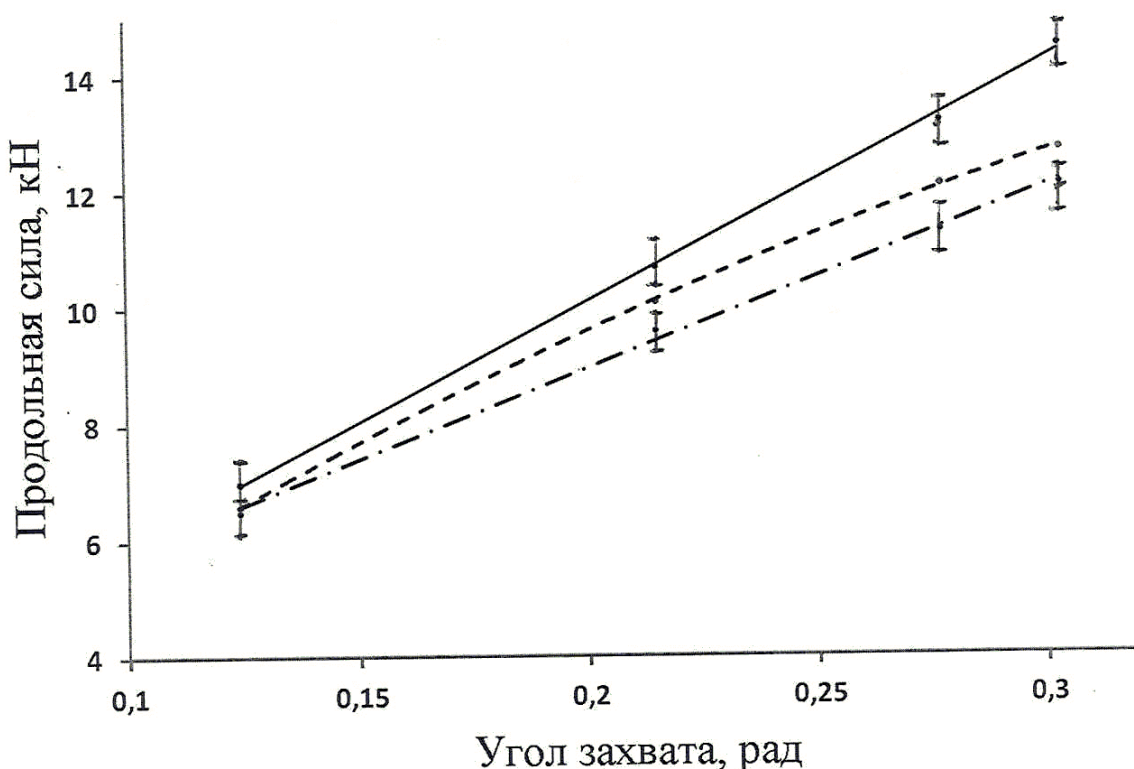


Рисунок 3.12 – График зависимости продольной силы, обеспеченной резервом сил трения при прокатке сочлененных профилей

Влияние изучаемых профилей валков, формирующих сочлененные заготовки, позволило сделать следующие заключения: с увеличением угла захвата увеличивается разность между продольными силами, полученными на валках с разным профилем. Такая закономерность объясняется действием активных сил трения на боковых поверхностях сочлененного профиля, состоящего из прямоугольных калибров. С увеличением угла захвата площадь кон-

такта с боковыми стенками прямоугольных калибров увеличивается, что, в свою очередь, увеличивает продольную силу. Расчетные результаты хорошо согласуются с опытными значениями, ошибка аппроксимации не превышает 8%.

Проведенная серия экспериментов позволила сделать заключение, что при формировании сочлененного профиля предпочтительней использовать двоянный прямоугольный калибр, чем в гладкие валки с выступом, так как при прочих равных условиях продольная сила будет иметь большую величину, особенно при больших углах захвата. Такое преимущество позволит обеспечить стабильность продольного разделения неприводным делительным устройством.

Была проведена серия экспериментов по изучению влияния угла захвата на продольную силу при прокатке в сочлененных квадратных и круглых калибрах. Полученные экспериментальные результаты приведены на рисунке 3.13, где пунктирной – экспериментальные значения при прокатке в двоянном квадратном калибре, сплошной – теоретические значения, полученные по формулам (2.8), (2.12), пунктир с двумя точками – экспериментальные данные при прокатке в двоянном круглом калибре, штриховой – расчетные значения полученные по формуле (2.11), (2.12). Как и в рассматриваемых ранее экспериментальных данных, с увеличением угла захвата продольная сила увеличивается, что связано с увеличением площади контакта, где действуют активные силы трения, обусловленные резервом сил трения. Форма сочлененных калибров также влияет на величину продольной силы, так при использовании сочлененных квадратных калибров при прочих равных условиях продольная сила больше, чем при использовании сочлененных круглых калибров. Такую особенность можно объяснить тем, что площадь контакта при прочих равных условиях в квадратном калибре больше, чем у круглого калибра, следовательно, величина резерва сил трения больше. Согласно литературным данным, стеснение в квадратном калибре больше, чем в круглом.

Совокупность этих факторов и приводит к увеличению продольной силы при прокатке в сочлененном квадратном калибре.

Сравнение экспериментальных данных с теоретическими значениями показало хорошую сходимость результатов, ошибка не превысила 9 – 11%, что дает основание рекомендовать полученные зависимости для разработки рациональных режимов процесса прокатки-разделения с использованием не-приводного делительного устройства.

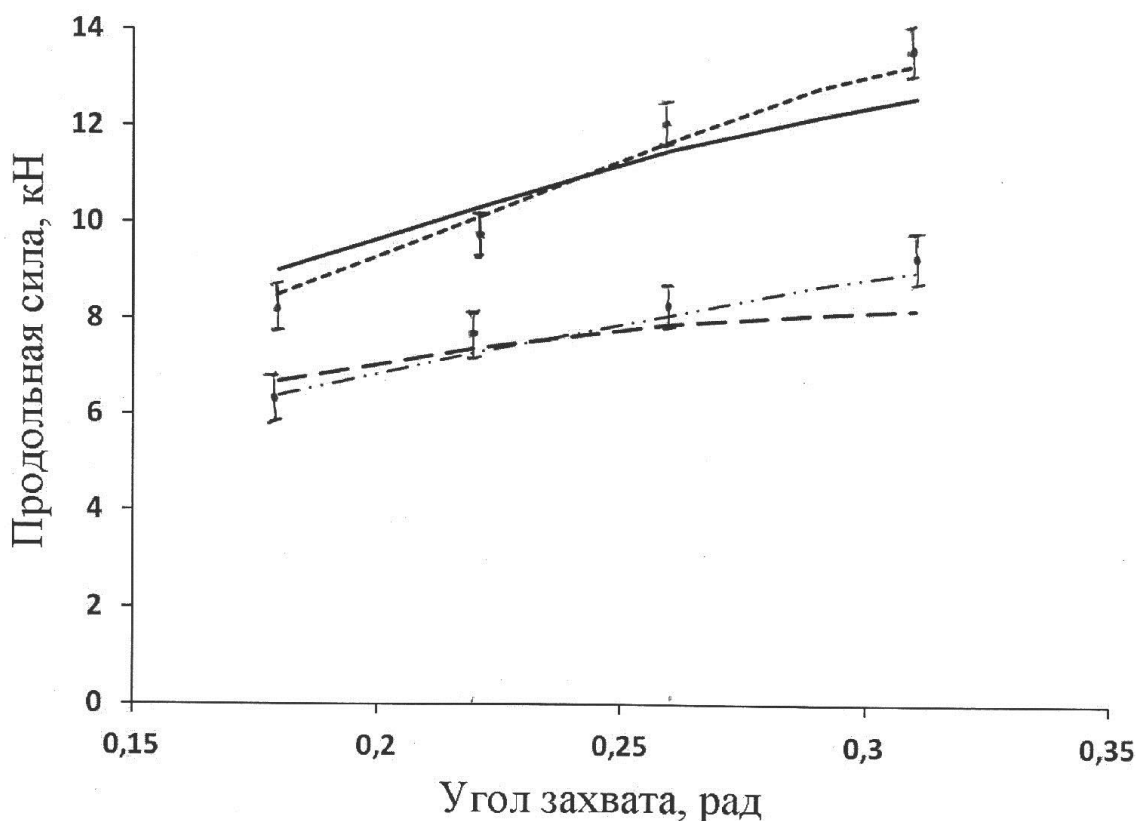


Рисунок 3.13 – Зависимость продольной силы, обеспеченной резервом сил трения, от угла захвата и формы калибра

Приведенные выше экспериментальные результаты рассматривают абсолютные значения продольной силы, которые существенно зависят от механических свойств прокатываемого материала при различных температурно-скоростных условиях формоизменения. В этом плане, как было отмечено выше, более информативна относительная величина - отношение напряжения

подпора к сопротивлению деформации  $\sigma_1/\sigma_s$  (показатель величины резерва сил трения). На рисунке 3.14 приведены экспериментальные значения по влиянию коэффициента вытяжки и формы калибров (гладкие валки с выступом и сдвоенный прямоугольный калибр) на величину отношения напряжения подпора к сопротивлению деформации, где сплошной линией – сдвоенный прямоугольный калибр, пунктирный – гладкие валки с выступом.

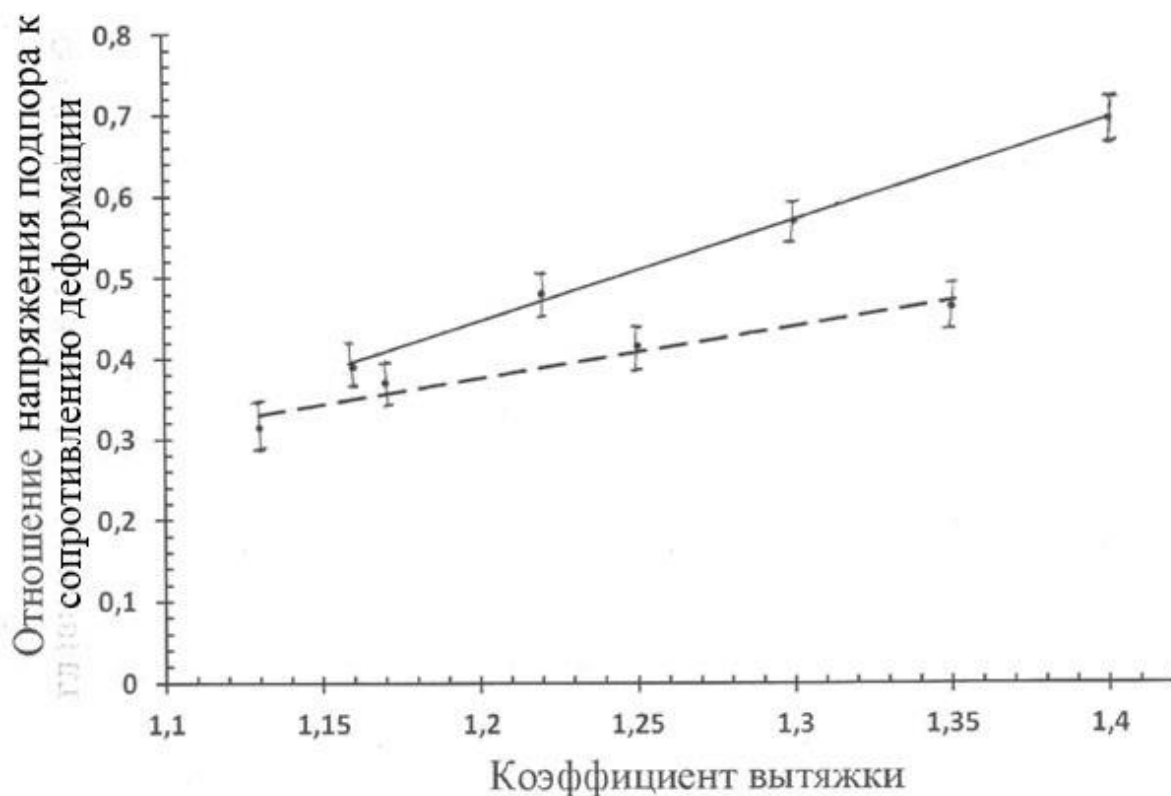
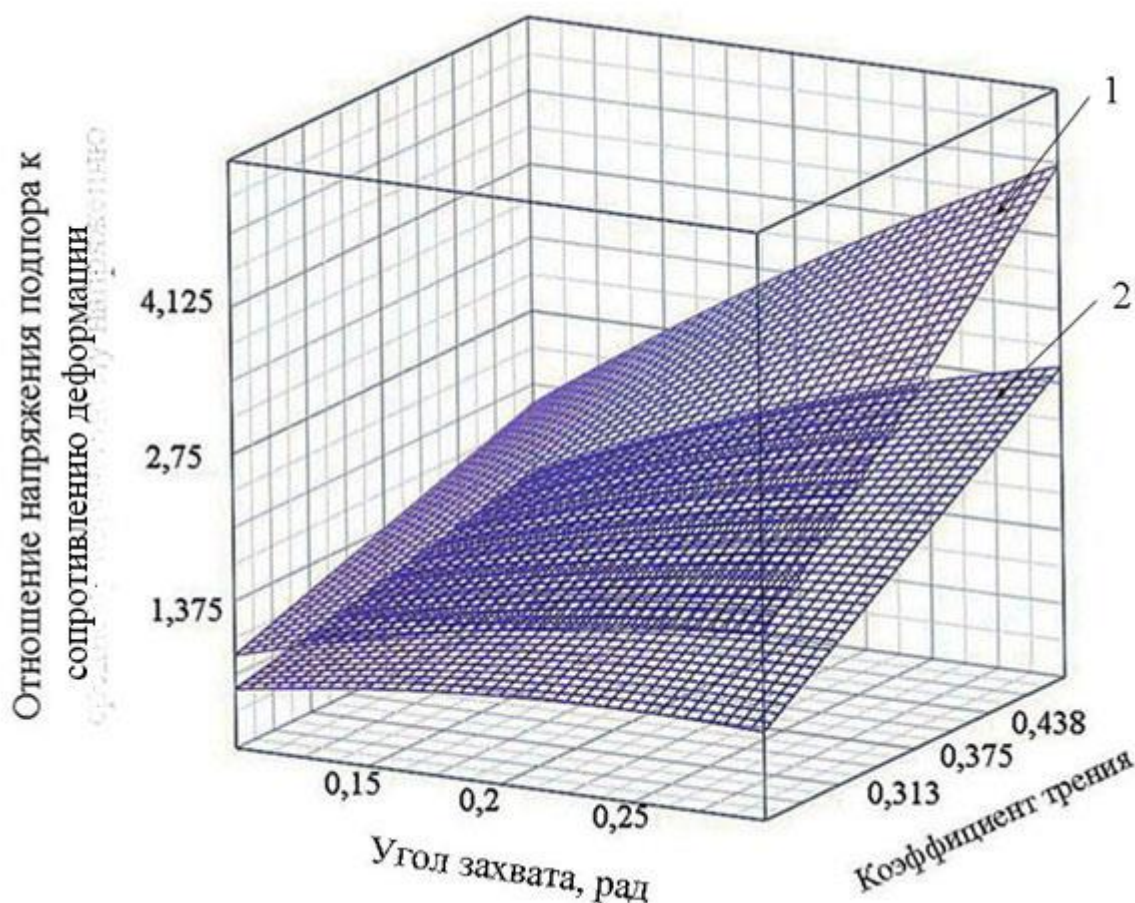


Рисунок 3.14 – Отношение напряжения подпора к сопротивлению деформации от коэффициента вытяжки и формы валков

Для изучения влияния угла захвата и коэффициента трения на величину отношения напряжения подпора к сопротивлению деформации ( $\sigma_1/\sigma_s$ ) при прокатке сочлененных квадратных и круглых профилей был проведен численный эксперимент с использованием зависимостей (2.8), (2.11). Изучалось влияние коэффициента трения в пределах от 0,25 до 0,5 и угла захвата от 0,1 до 0,3. Рассматриваемые режимы обычно используются в промышленных условиях при формировании окончательного сочлененного профиля. Полученные диаграммы приведены на рисунке 3.15. Согласно приведенным дан-

ным, с увеличением угла захвата и коэффициента трения величина  $\sigma_1/\sigma_s$ , характеризующая продольную силу, увеличивается, причем в большей степени на это влияет коэффициент трения. Такая закономерность не противоречит основополагающим принципам теории обработки металлов давлением. На величину существенное влияние оказывает форма сочлененного профиля. При прочих равных условиях продольная сила при получении сочлененных квадратов больше, чем сочлененных кругов. Такой результат объясняется тем, что при одинаковой площади поперечного сечения периметр сочлененного квадрата больше, чем периметр сочлененного круга, следовательно, активная площадь контакта у сочлененного квадрата больше и величина  $\sigma_1/\sigma_s$  больше.



1 – сочлененный квадратный калибр; 2 – сочлененный круглый калибр

Рисунок 3.15 – Диаграмма зависимости показателя резерва сил трения ( $\sigma_1/\sigma_s$ ) от угла захвата, коэффициента трения, формы калибра

Результаты лабораторных исследований факторов, влияющих на продольную силу, с использованием модельного материала (свинца), можно применять при разработке рекомендаций по совершенствованию технологии прокатки – разделения на действующем производстве. Для перехода от модельных величин ( $Q_{1.м}$ ) к натуральным ( $Q_{1.н}$ ), учитывающим материал и размеры полосы, достаточно применить закон пластического подобия [116]:

$$Q_{1.н} = Q_{1.м} \frac{\sigma_{сн}}{\sigma_{см}} \frac{F_н}{F_м}, \quad (3.25)$$

где  $\sigma_{сн}, \sigma_{см}$  – соответственно, сопротивление деформации натурального и модельного материала, МПа;  $F_н, F_м$  – соответственно, площадь поперечного сечения натурной и модели, мм<sup>2</sup>.

### 3.2.2. Изучения условий продольного разделения сочлененных профилей неприводным устройством

Используя полученные теоретические зависимости для определения потребного усилия при разделении неприводным инструментом способами передавливания и разрыва, проанализируем влияние важных технологических факторов на величину продольного усилия разделения. Особенность рассматриваемых способов заключается в разных отношениях углов при вершине делительных роликов ( $\omega_p$ ) и в месте сочленения профилей ( $\beta$ ):

при разделении передавливанием  $\beta > \omega_p$

при разделении разрывом  $\beta < \omega_p$ .

Рассмотрим процесс продольного разделения передавливанием делительными роликами диаметром 80 мм в горячем состоянии сочлененной полосы состоящей из двух квадратов со стороной 20 мм. В качестве исследуемых факторов будем рассматривать толщину перемычки и угол при вершине делительного ролика. Полученная диаграмма показана на рисунке 3.16. Ожидаемо наиболее существенно на продольную силу при разделении передав-

ливанием влияет толщина перемычки, которую наиболее рационально с точки зрения энергозатрат планировать не более 2 мм. Угол при вершине делительного ролика также влияет на продольную силу при разделении передавливанием причем в интервале от  $18^{\circ}$  до  $63^{\circ}$  увеличение продольной силы от угла при вершине ролика незначительно. С точки зрения стойкости делительного ролика угол при вершине целесообразно принимать в районе  $60^{\circ}$ , в этом случае отношение углов при вершине делительного ролика к углу между сочлененными профилями составит 0,67. При больших значениях отношение углов продольная сила существенно увеличивается, меньшие значения приводят к быстрому выходу из строя режущей части делительных роликов.

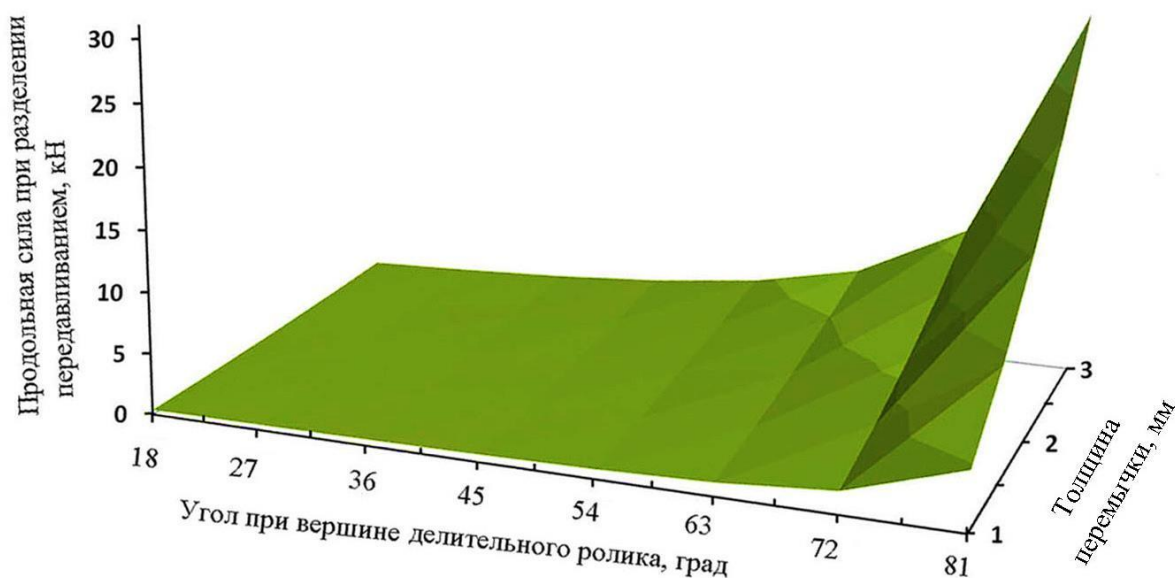


Рисунок 3.16 – Диаграмма зависимости продольной силы при передавливании от толщины перемычки и угла при вершине делительного ролика

Проведенные аналитические исследования процесса продольного разделения передавливанием позволяют сделать рекомендации по толщине перемычки от 1 до 2 мм и отношению углов при вершине делительного ролика к углу между сочлененными профилями в районе 0,67. Рекомендованные усло-

вия позволят снизить величину продольной силы для разделения и продлить срок службы делительного ролика.

Рассмотрим способ разделения перемычки разрывом. Как было показано выше, продольная сила, необходимая для разделения разрывом, зависит от усилия, затраченного непосредственно на разрыв перемычки, и силы для изгиба разделяемых полос при разрыве. В первом случае усилие будет зависеть в основном от толщины перемычки и угла при вершине ролика. Во втором случае - от формы и размеров разделяемых полос и угла при вершине делительного ролика. Рассмотрим процесс продольного разделения двух сочлененных квадратов со стороной 20 мм в горячем состоянии с толщиной перемычки, меняющейся от 1 до 3 мм, роликом диаметром 80 мм при изменении угла при вершине от  $108^{\circ}$  до  $144^{\circ}$ . Диаграмма зависимости силы, необходимой для разрыва перемычки от толщины перемычки, и угла при вершине делительного ролика показана на рисунке 3.17.

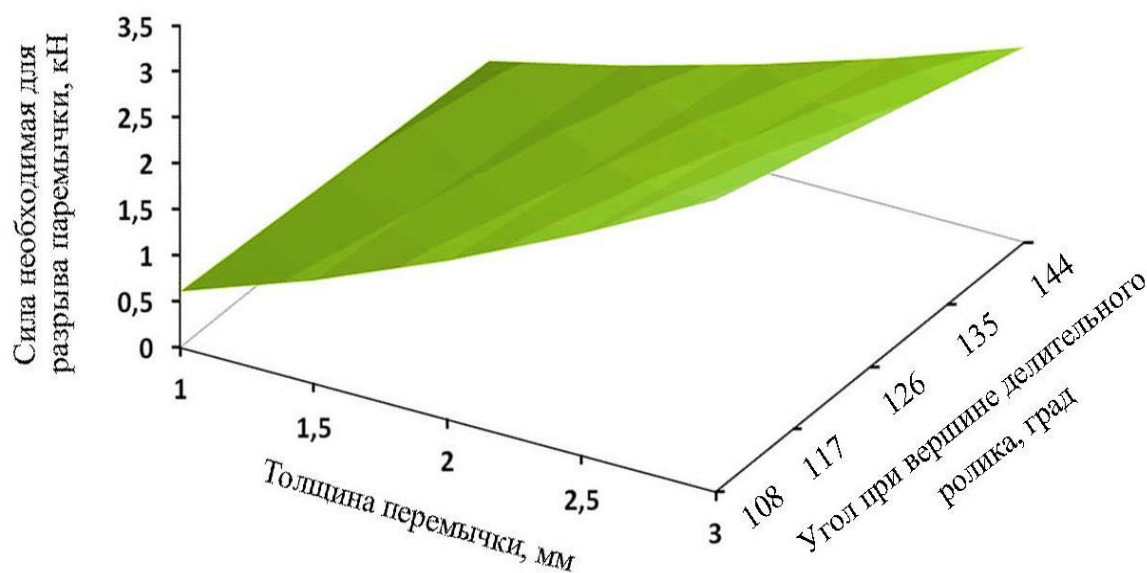


Рисунок 3.17 – Диаграмма зависимости силы, необходимой для разрыва перемычки, от толщины перемычки и угла при вершине делительного ролика

Согласно полученным данным, наибольшее влияние на усилие разрыва оказывает толщина перемычки, с увеличением которой усилие увеличивается. Увеличение угла при вершине делительного ролика влияет на усилие незначительно. Из соображений снижения усилия, необходимого при разрыве, целесообразно толщину перемычки принимать в пределах от 1 до 2 мм.

Рассмотрим вторую составляющую силы, используемую при раздвигании разделяемых полос. Результаты моделирования приведены на рисунке 3.18, на котором рассмотрен случай разделения сочлененных квадратных профилей со сторонами квадрата от 10 до 30 мм и углами при вершине делительных роликов от  $108^{\circ}$  до  $144^{\circ}$ , или отношение углов при вершине делительного ролика к углу между сочлененными профилями 1,2 – 1,6.

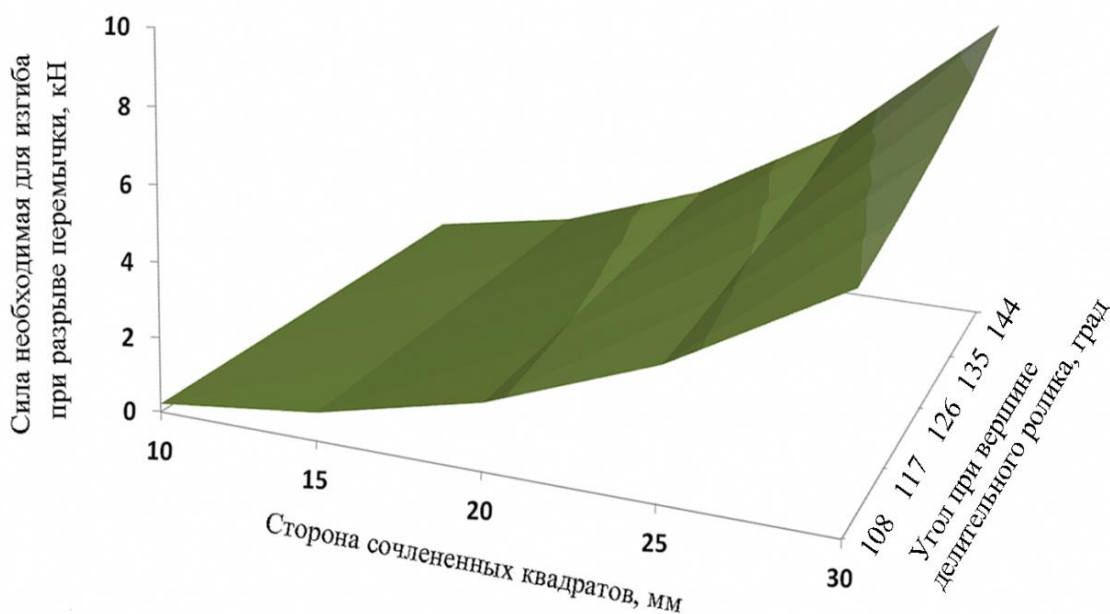


Рисунок 3.18 – Диаграмма зависимости силы изгиба при разрыве перемычки от размера стороны сочлененного квадрата и угла при вершине делительного ролика

Согласно полученным данным, основное влияние на силу, необходимую для изгиба, оказывает форма и площадь поперечного сечения разделяемых полос. Увеличение угла при вершине делительного ролика увеличивает

силу, необходимую для изгиба. Это связано с уменьшением плеча приложения силы с увеличением угла при вершине ролика. Этот эффект возрастает с увеличением сечения разделяемых профилей. Существенное увеличение силы, необходимой на изгиб, от сечения разделяемых полос ограничивает способ разделения разрывом только мелкими сечениями, которые обычно получают в последних клетях чистовых групп мелкосортных станов. В рассматриваемом примере при разделении сочлененных квадратов со стороной 20 мм сила изгиба сопоставима с усилием, необходимым при разрыве, с увеличением сечения квадратов сила изгиба становится определяющей и намного превышает усилие на разрыв. Полученные результаты дают основание рекомендовать способ разделения разрывом для профилей сечением сопоставимым с квадратом 20х20 мм или меньше.

Используя полученные теоретические зависимости, рассмотрим влияние толщины перемычки и угла при вершине делительного ролика на продольную силу необходимую для разделения сочлененного профиля, состоящего из квадратов со стороной 20 мм. Результаты моделирования приведены на рисунке 3.19.

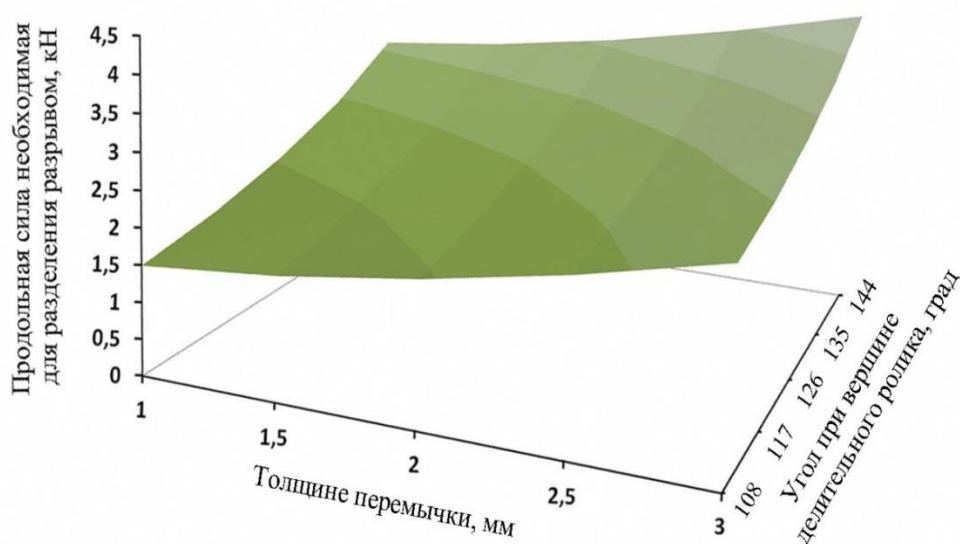


Рисунок 3.19 – Диаграмма зависимости продольной силы, необходимой для разделения разрывом, от толщины перемычки и угла при вершине делительного ролика

Как следует из полученных данных, с увеличением толщины перемычки и угла при вершине делительного ролика продольная сила увеличивается.

Необходимо отметить, что в зависимости от формы разделяемых сочлененных профилей угол между ними может меняться, поэтому полученные данные для сочлененных квадратов удобней представить в безразмерном виде и таким образом рекомендовать для профилей другой формы. Так, рекомендованный угол в  $60^0$  при разделении передавливанием удобней заменить отношением углов при вершине делительного ролика и между сочлененными профилями, равном 0,67.

При разделении разрывом целесообразно использовать делительные ролики с отношением угла при вершине к углу между сочлененными профилями от 1,2 до 1,6.

Для проверки достоверности полученных теоретических данных был проведен эксперимент с использованием сочлененных образцов из свинца. Цель эксперимента – изучение влияния формы и сечения сочлененного образца на продольную силу, необходимую при разделении разрывом. В эксперименте использовали сочлененные прямоугольные образцы (рисунок 3.11) с площадью поперечного сечения каждого элемента  $625 \text{ мм}^2$ , при этом момент сопротивления изгибу  $2604 \text{ мм}^3$ . Сочлененные квадратные образцы с площадью поперечного сечения одного элемента  $400 \text{ мм}^2$ , при этом момент сопротивления изгибу  $946 \text{ мм}^3$ . Толщина перемычки у образцов изменялась от 2 мм до 6 мм с шагом 1 мм. Продольная сила необходимая для разделения образцов разрывом, определялась на лабораторной установке (рисунок 3.9). Проведенные исследования позволили установить влияние формы сочлененного образца, толщины перемычки при разделении разрывом на значение продольной силы.

Полученные экспериментальные данные приведены на рисунке 3.20, где цифрой 1 экспериментальные результаты продольной силы при разделении сочлененных прямоугольных профилей разрывом, 2 – расчетные значения продольной силы при разделении сочлененных прямоугольных профи-

лей разрывом, 3 – расчетные значения продольной силы при разделении сочлененных квадратных профилей разрывом, 4 – экспериментальные результаты продольной силы при разделении сочлененных квадратных профилей разрывом.

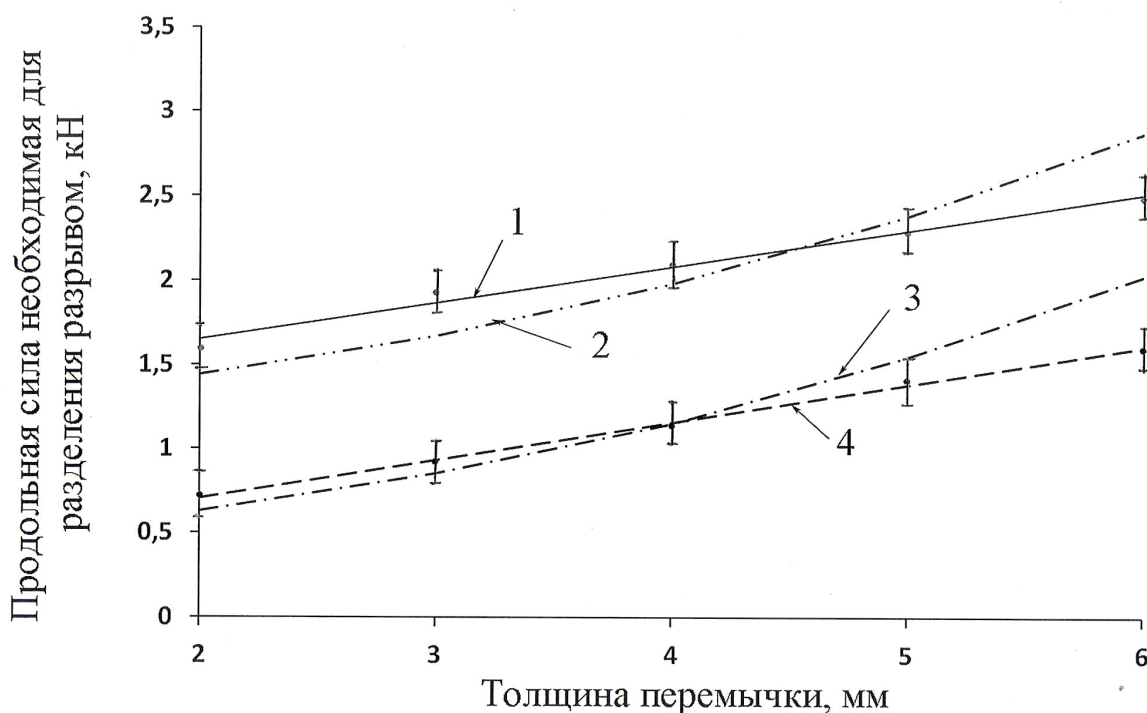


Рисунок 3.20 – Значения продольной силы, необходимой для разделения разрывом сочлененных профилей различной формы

Как видно из приведенных на рисунке 3.20 результатов, величина продольной силы, необходимой для разделения разрывом сочлененного прямоугольного профиля, больше, чем сочлененных квадратов. Такую закономерность можно объяснить большей по величине составляющей усилия, затрачиваемого на изгиб при разделении. Подвергающийся изгибу прямоугольный профиль имеет большую площадь сечения и момент сопротивления изгибу, чем квадратный профиль, используемый в экспериментах. Увеличение толщины разделяемой перемычки ожидаемо приводит к увеличению продольной силы, необходимой для разделения, причем характер зависимостей как для сочлененных прямоугольных, так и квадратных профилей одинаков. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений показывает хорошую

сходимость результатов в пределах доверительного интервала при небольших значениях разделяемой перемычки. Полученные экспериментальные и теоретические результаты еще раз подтверждают тезис, что разделение разрывом целесообразно проводить на профилях с небольшими поперечными сечениями с небольшими моментом сопротивления изгибу. Рассмотрим три обычно используемых на практике формы сочлененных калибров: сочлененные квадраты, сочлененные прямоугольники, сочлененные круги. При одинаковой площади поперечного сечения элементов  $314 \text{ мм}^2$  момент сопротивления изгибу сочлененных квадратов  $655 \text{ мм}^3$ , сочлененных кругов  $800 \text{ мм}^3$ , сочлененные прямоугольники  $924 \text{ мм}^3$  [117]. Из полученных данных следует, что с точки зрения снижения усилия разделения разрывом предпочтительной формой является сочлененные квадраты.

### **3.2.3 Изучение продольной устойчивости полосы в промежутке между клетью, формирующей сочлененный профиль, и неприводным делительным устройством**

Допустимое расстояние между очагом деформации и неприводным делительным инструментом - важный параметр, необходимый для правильного выбора компоновки оборудования. Как следует из зависимости (2.29), допустимое расстояние зависит от продольной силы, требуемой при разделении, модуля упругости первого рода материала полосы, характера заземления (коэффициент приведения длины) и минимального момента инерции сечения сочлененного профиля. Из перечисленных выше факторов, влияющих на допустимое расстояние, не определенным применительно к процессу прокатки – разделения является коэффициент приведения длины, изменяющийся в зависимости от характера закрепления от 0,5 до 2 [104, 105]. В зависимости от характера закрепления наиболее подходящими для процесса прокатки – разделения являются коэффициенты приведения длины 0,5 и 0,7. Для установления величины коэффициента приведения длины при реализации процесса

прокатки-разделения были проведены лабораторные исследования. Лабораторные эксперименты проводились с использованием свинцовых образцов при исходных размерах: высота 12,5 мм, ширина 21 мм. Образцы деформировали в приводной клети с абсолютным обжатием 2,5 мм, при этом уширение составило 1,5 мм. В процессе эксперимента усилие, при котором происходила потеря устойчивости ( $P_{кр}$ ), определяли образцовым динамометром и месдозой с возможностью записи результатов (описание силоизмерителя в разделе 3.1.1), расстояние от очага деформации до упора с фиксатором устанавливали 300, 350, 400, 500 мм. При тех же условиях определяли теоретическое значение  $P_{кр}$ , используя значения коэффициента приведения длины 0,5 и 0,7. Полученные экспериментальные и теоретические данные приведены на рисунке 3.21, где сплошной линией показаны экспериментальные результаты, пунктирной - расчетные значения при коэффициенте приведения длины 0,5, пунктир с точкой - расчетные значения при коэффициенте приведения длины 0,7.

Как следует из результатов приведенных на рисунке 3.21, расчетные данные, полученные с использованием коэффициента приведения длины 0,7, ближе к экспериментальным значениям, чем расчет с коэффициентом приведения длины 0,5. Таким образом, при реализации технологии прокатки – разделения следует рекомендовать при расчетах допустимого расстояния использовать коэффициент приведения длины 0,7. Используя полученную теоретическую зависимость (2.29), проведен численный анализ влияния толщины перемычки, угла при вершине делительного ролика на предельно допустимое расстояние между очагом деформации клети, формирующей сочлененный профиль, и неприводным делительным устройством. В качестве примера смоделированы условия продольного разделения разрывом сочлененного квадрата со стороной 12 мм в чистовой непрерывной группе мелко-сортного стана. Толщина перемычки меняется от 1 до 3 мм с шагом 0,5 мм. Такие значения толщины перемычки рекомендованы в литературе [118-120]. Угол при вершине делительного ролика варьируется от 108 до 144<sup>0</sup>. Резуль-

таты численного моделирования приведены на рисунке 3.22. Как следует из полученных результатов, увеличение толщины перемычки и угла при вершине делительного ролика приводит к уменьшению допустимого расстояния между очагом деформации, формирующем сочлененный профиль, и неподвижным делительным устройством.

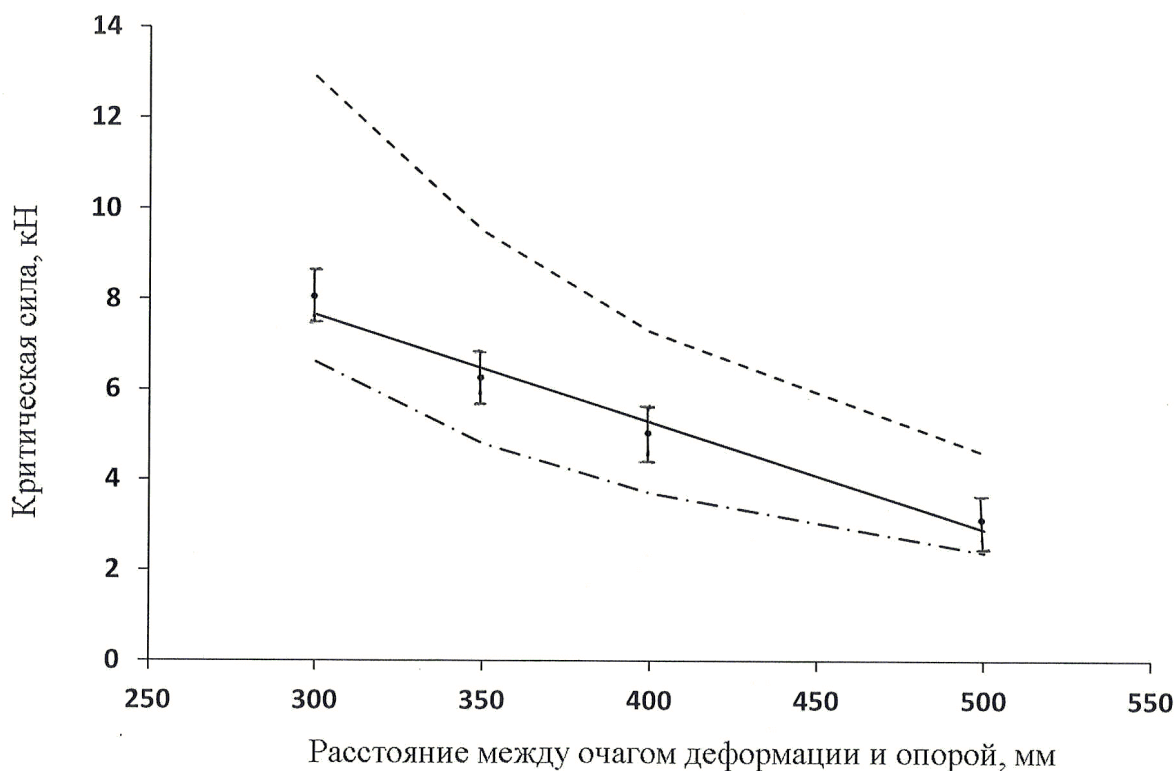


Рисунок 3.21 – Зависимость критической силы от расстояния между очагом деформации и упором

Полученные закономерности объясняются увеличением продольного усилия, используемого для разделения. Необходимо обратить внимание на то, что полученные зависимости и результаты численных экспериментов показывают предельно допустимые значения расстояния при условии прямолинейного выхода полосы из валков. В реальных условиях производства необходимо учитывать многообразие факторов, влияющих на прямолинейный выход полосы, изменение механических свойств, колебание температуры и толщины перемычки. На практике пользуются понижающими коэффициентами, которые гарантируют стабильность процесса [121, 122]. Для определе-

ния продольной устойчивости целесообразно использовать понижающий коэффициент 0,8, что позволит гарантировать стабильность процесса продольного разделения при незначительных колебаниях температуры сочлененного профиля и толщины перемычки.

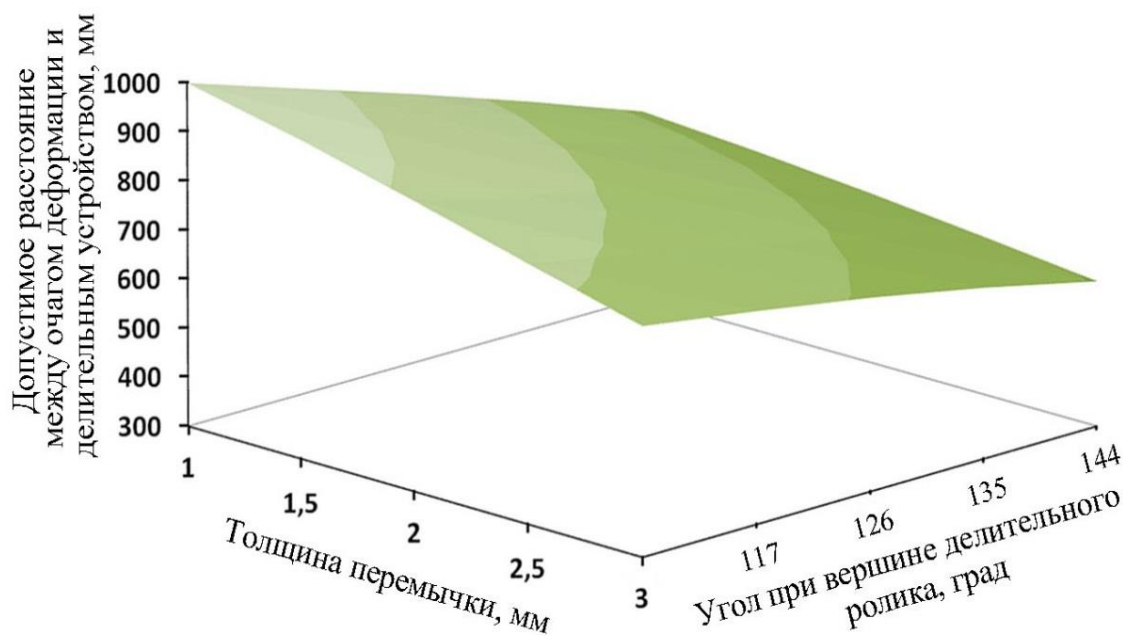


Рисунок 3.22 – Диаграмма зависимости допустимого расстояния между очагом деформации, формирующем сочлененный квадратный профиль, и неприводным делительным устройством при разделении разрывом, гарантирующего продольную устойчивость

Условие продольной устойчивости определяет компоновку оборудования системы очаг деформации – неприводное делительное устройство. Если по конструктивным соображениям невозможно обеспечение естественной продольной устойчивости, то необходимо усложнение выводной арматуры за счет введения дополнительных удерживающих проволоок, трубок.

Приведенный выше материал позволил получить новые данные по влиянию основных технологических параметров на условия ведения процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного устройства, а также оценена достоверность предлагаемых теоретических за-

зависимостей для определения продольной силы  $Q_1$ , обеспеченной резервом сил трения клетки, формирующей сочлененный профиль, продольной силы  $Q_2$ , необходимой при продольном разделении. Определены требования к компоновке оборудования системы прокатная клетка - неприводное делительное устройство, гарантирующие продольную устойчивость полосы. Используя полученные теоретические зависимости, можно определить область осуществимости и совершенствовать технологический режим процесса прокатки-разделения с целью снижения материальных затрат. Для удобства расчетов разработана блок – схема алгоритма определения рациональных параметров процесса прокатки – разделения, приведенная на рисунке 3.23.

На начальной стадии расчетов определяется значение продольной силы, обусловленной резервом сил трения при формировании сочлененного профиля (блоки 2 – 6 алгоритма, приведенного на рисунке 3.23). При расчете блока 3 используются зависимости 2.5, 2.12, блока 5 – зависимости 2.8, 2.12, блок 6 – зависимости 2.11, 2.12. Следующий этап расчетов связан с определением необходимой для разделения продольной силой в зависимости от способа разделения и толщины перемышки. При расчетах, осуществляемых в блоке 9, используется зависимость 2.26, блок 10 – зависимость 2.15. Полученные расчетные величины усилия, необходимого при разделении одним из способов ( $Q_2$ ), сопоставляются с продольной силой, обеспеченной резервом сил трения в очаге деформации, формирующей один из вариантов сочлененных профилей ( $Q_1$ ). Проверяется условие  $Q_1 > Q_2$ , если условие не выполняется, делается шаг итерации по толщине перемышки (толщина уменьшается на величину шага итерации). При выполнении условия проводятся расчеты в блоке 12. С использованием зависимости 2.29 определяется максимально допустимое расстояние от линии, соединяющей центры валков клетки, формирующей сочлененный профиль, до роликов неприводного делительного устройства. В блоке 13 сопоставляется расчетное значение допустимого расстояния с конструктивно возможным. В случае выполнения условия осуществляется вывод рациональных параметров технологии прокатки-

разделения на печать. При невыполнении условия, производится итерация, связанная с уменьшением толщины перемычки.

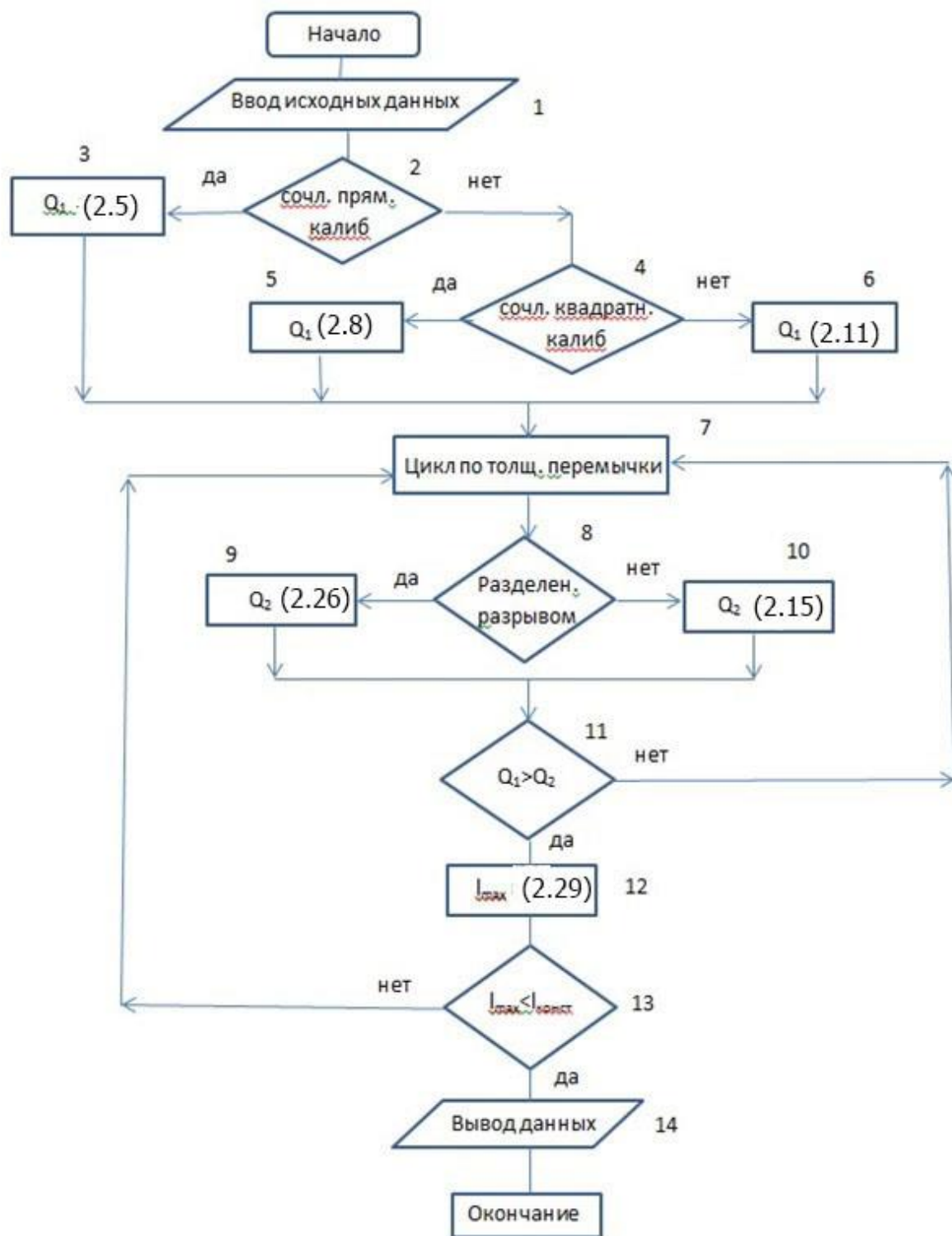


Рисунок 3.23 – Блок – схема алгоритма определения области осуществимости процесса прокатки – разделения и поиска рациональных режимов его реализации

Расчеты с использованием приведенной блок – схемы позволяют определить условия формирования окончательного сочлененного профиля, обеспечивающие достаточную для последующего разделения продольную силу, максимальную толщину соединительной перемычки, которая устойчиво будет разделяться неприводным делительным устройством, компоновку неприводного делительного устройства относительно клетки, формирующей окончательный сочлененный профиль, гарантирующую продольную устойчивость полосы при разделении.

Результаты, приведенные в данной главе, опубликованы в технической литературе [123, 124, 125, 126, 127].

## **Выводы**

1. Экспериментально установлено, что на величину продольной силы существенное влияние оказывает угол захвата, при увеличении которого продольная сила увеличивается, коэффициент трения и форма сочлененного калибра. Наилучшие результаты получены при использовании сочлененного квадратного калибра.

2. Доказано, что при разделении передавливанием отношение углов в месте раздела к углу при вершине делительного ролика должно составлять 0,67, а при разделении разрывом от 1,2 до 1,6. С точки зрения технологичности предпочтительно разделение разрывом, при этом минимальное усилие разрыва имеет место при использовании сочлененных квадратов.

3. Получена зависимость для определения предельно допустимого расстояния от очага деформации до делительного устройства, обеспечивающего продольную устойчивость полосы. Установлено, что при реализации процесса прокатки – разделения коэффициент приведения длины целесообразно принимать 0,7.

4. Доказано, что при разделении передавливанием форма и площадь поперечного сечения сочлененных профилей не оказывают влияние на необходимое продольное усилие. На продольное усилие при разделении разры-

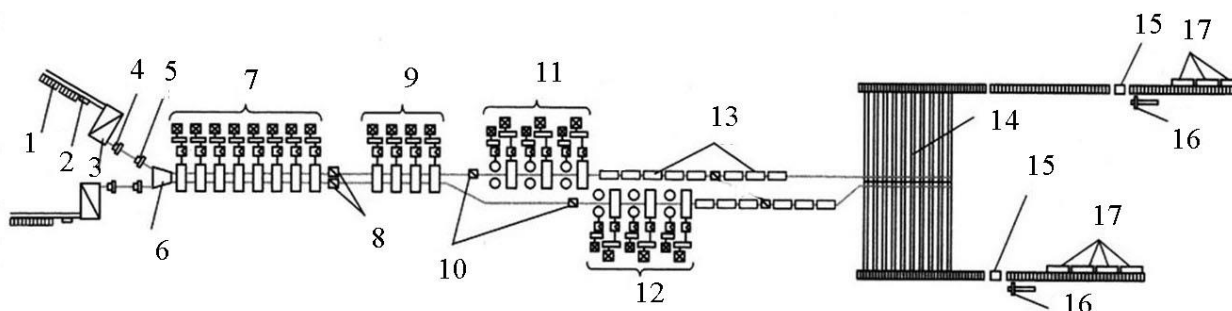
вом оказывает влияние форма и площадь поперечного сечения сочлененного профиля. При увеличении площади поперечного сечения существенно увеличивается продольная сила, поэтому разделение разрывом целесообразно использовать в чистовых группах клетей мелкосортных станов.

5. Для облегчения практического использования полученных результатов разработана блок – схема алгоритма определения области осуществимости процесса прокатки – разделения и поиска рациональных режимов его реализации.

#### **4. Использование результатов исследований для совершенствования технологических режимов прокатки-разделения в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с целью снижения материальных затрат**

На непрерывном мелкосортном стане 250-1 АО ЕВРАЗ ЗСМК в 2012 году была освоена технология прокатки – разделения с использованием не приводных делительных устройств. Схема расположения оборудования на непрерывном мелкосортном стане 250-1 АО ЕВРАЗ ЗСМК приведена на рисунке 4.1. Непрерывный мелкосортный стан 250-1 АО ЕВРАЗ ЗСМК прокатывает следующий сортамент: арматурные профили №8, №10, №12, №14 круги диаметром 10, 12 мм, квадраты со стороной 10, 12 мм, уголки № 25, №32, №35, №40, №45 из квадратной заготовки 100x100 мм. Распределение сортамента по тоннажу показано на рисунке 4.2. Из приведенных данных видно, что основной сортамент стана составляют арматурные профили (394270 тонн), получаемые с использованием технологии прокатки – разделения. Реализуется рассматриваемая технология для получения арматурных профилей № 8, №10, №12 на стане следующим образом. Квадратные заготовки сечением 100x100 мм и длиной 11,5 м после осмотра нагреваются в двух методических печах до температуры 1180 – 1220<sup>0</sup>С. После нагрева выдаются из двух печей по одной заготовки, трайб-аппаратами транспортируются к черновой группе, состоящей из восьми горизонтальных клетей, в которых ведется прокатка одновременно двух заготовок. В клетях А – 5 используются прямоугольные калибры, в последней клети - ребровой овал. Суммарный коэффициент вытяжки в черновой группе клетей для арматуры №12 – 10,52, №10 – 10,93, №8 – 14,57. Промежуточная группа состоит из четырех клетей с чередованием калибров овал – ребровой овал. Суммарный ко-

эффицент вытяжки в промежуточной группе для №12 – 1,37, №10 – 2,08, №8 – 2,72. Прокатка в промежуточной группе ведется в горизонтальных клетях одновременно двух заготовок.



1 – загрузочные решетки; 2 – карманы; 3 – нагревательная печь; 4, 5 – трайб-аппарат; 6 – распределительное устройство; 7 – черновая группа клетей; 8 – аварийные ножницы; 9 – промежуточная группа клетей; 10 – летучие ножницы; 11, 12 – чистовые группы клетей; 13 – установка термоупрочнения; 14 – реечный холодильник; 15 – ножницы холодной резки; 16 – передний упор; 17 – карманы

Рисунок 4.1 – Схема расположения оборудования непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

После прокатки в промежуточной группе клетей овальные заготовки поступают в две чистовые группы клетей, где прокатка осуществляется в первой вертикальной клетке (12 клеть) и в пяти горизонтальных (13 – 17 клетки). В двенадцатой клетке из овальной заготовки получают ромб, в тринадцатой - квадрат с вогнутыми сторонами. После кантовки квадрата с вогнутыми сторонами на  $45^{\circ}$  полоса задается в калибр четырнадцатой клетки, где формируется предварительный сочлененный профиль. В пятнадцатой клетке получают окончательный сочлененный профиль, состоящий из двух кругов, готовый к продольному разделению роликами не приводного делительного устройства. Разделение происходит разрывом перемычки. В шестнадцатой клетке получают два овальных профиля, которые после кантовки скручиванием в выводной валковой арматуре поступают в чистовые калибры семнадцатой клетки. Суммарный коэффициент вытяжки по площади поперечного

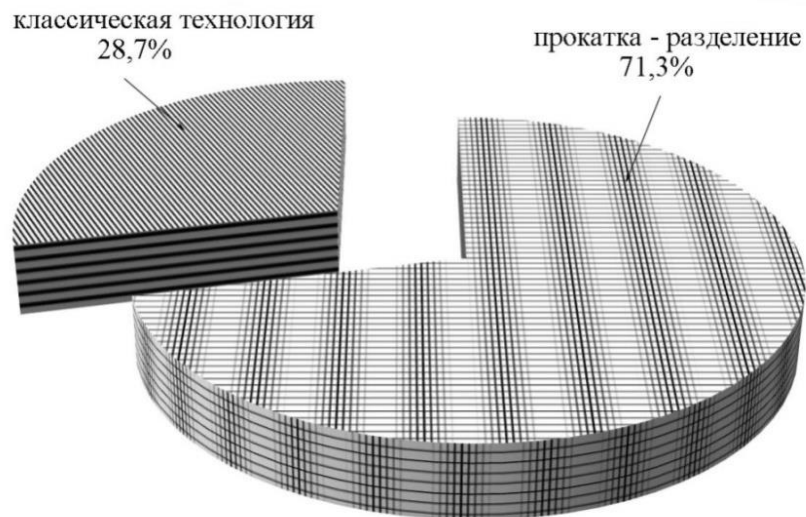
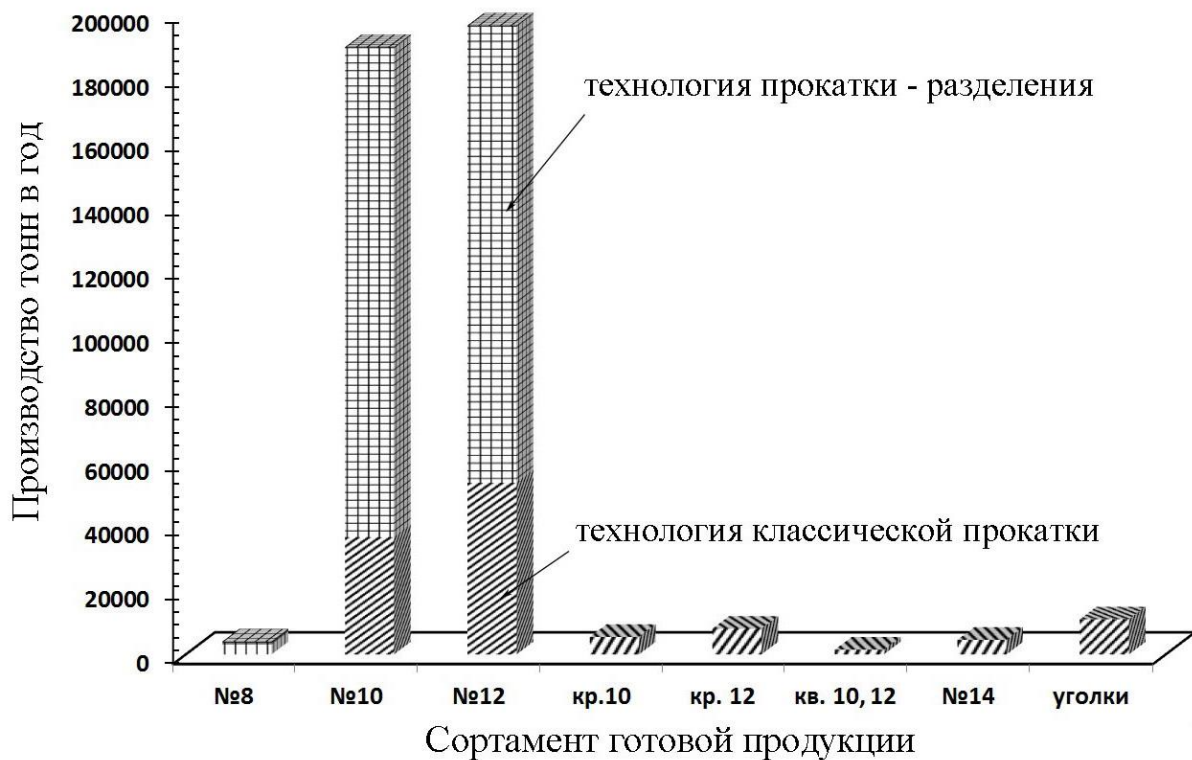


Рисунок 4.2 – Анализ сортамента непрерывного мелкосортного ста- на 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

сечения в чистовой группе для №12 – 5,93, №10 – 5,45, №8 – 4,98. Коэффициенты вытяжки в 15 клетки, формирующей окончательный сочлененный профиль, для №12 – 1,05, №10 – 1,08, №8 – 1,02. Готовые арматурные профили поступают в трассы для ускоренного охлаждения, установленные за последними клетями чистовых групп. В зависимости от номера профиля,

требуемых механических свойств в соответствии с ТУ 14-1-524-2006 назначаются разные режимы охлаждения. Окончательное охлаждение осуществляется на двухстороннем холодильнике с последующей порезкой на длины согласно заказам и отгружаются потребителям.

При освоении технологии прокатки – разделения была проведена косметическая реконструкция основного оборудования стана. Пятнадцатая клетка, формирующая окончательный сочлененный профиль, осталась прежней, только были реставрированы подшипники прокатных валков. Как показывает опыт освоения технологии прокатки – разделения на других действующих сортовых станах [42, 56], обычно клетки, формирующие окончательный сочлененный профиль, заменяются на специальные клетки повышенной жесткости. Такой подход позволяет обеспечить стабильный размер профиля, увеличить коэффициент вытяжки и, соответственно, величину продольной силы, необходимой для разделения. Высокая жесткость клетки, формирующей сочлененный профиль, позволяет за счет варьирования коэффициента вытяжки добиться стабильности процесса продольного разделения. Так как реконструкция действующего непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» для перехода на технологию прокатки – разделения не была осуществлена должным образом (замена 15 клетки), в процессе работы выявились все недостатки, следствием чего стало увеличение материальных затрат за счет брака в недокатах и незапланированные простои основного оборудования.

Одна из причин брака в недокатах и связанные с этим непредвиденные простои вызваны ошибочным выбором компоновки делительного устройства относительно линии, соединяющей центры валков 15 клетки, и неправильным выбором коэффициента вытяжки 15 клетки. Поиск допустимого расстояния и коэффициента вытяжки проводили опытным путем для арматуры №12, полагая, что этого достаточно и для более мелких профилей, таких как №10, №8, не учитывая разные значения продольных сил и условий устойчивости. Основным критерием при выборе места установки неприводного делительного

устройства было удобство монтажа и возможность разделения сочлененных профилей для получения арматуры №12. В результате такого подхода при прокатке в 15 клетки сочлененных профилей для арматуры №10 и №8 с последующим разделением периодически происходила потеря продольной устойчивости, недорез и забуривание (рисунок 4.3).

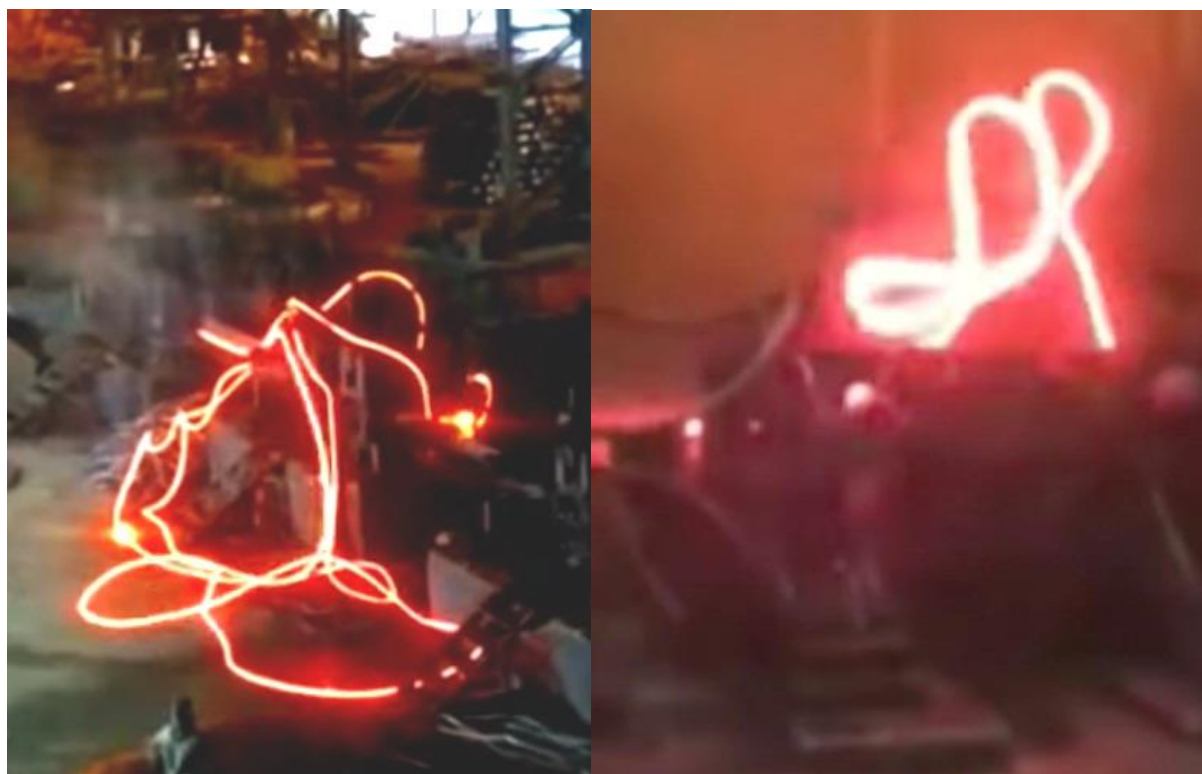


Рисунок 4.3 – Последствия бурения профиля при неправильной настройке неприводного делительного устройства.

Как было отмечено выше, 15 клеть, формирующая сочлененный профиль, не подверглась должной реконструкции, что не обеспечило ее достаточную жесткость. Недостаточную жесткость клетки пытались компенсировать небольшим коэффициентом вытяжки при прокатке в ней. Такое решение снижало усилие прокатки и уменьшало пружину 15 клетки, при этом уменьшая величину продольной силы, обусловленной резервом сил трения в очаге деформации, и создавая условия, при которых процесс продольного разделения становится нестабильным.

Еще одна проблема была связана с отсутствием информации о величине продольной силы, обеспеченной резервом сил трения 15 клетки, необходимой для расчета на прочность крепежа и деталей неприводного делительного устройства. Отсутствие данной информации и ошибки при настройке неприводного делительного устройства приводили к разрушению ее деталей с последующим бурением и простоем основного оборудования.

Положительный опыт использования технологии прокатки - разделения на непрерывном мелкосортном стане 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» дал основания рассмотреть возможность освоения технологии разделения строенного сочлененного профиля. В связи с этим возникла необходимость оценить реализуемость такого решения и уточнить технологические режимы прокатки – разделения строенного арматурного профиля.

Анализ причин брака в недокатах и непредвиденных простоев основного оборудования при использовании технологии прокатки – разделения в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволил сформулировать задачи исследования, направленные на устранения данных недостатков.

1. Обосновать место установки неприводного делительного устройства, обеспечивающее гарантированную продольную устойчивость при производстве арматурных профилей №8, №10, №12.

2. Оценить допустимые значения толщины перемычки сочлененных профилей и коэффициент вытяжки в 15 клетки для обеспечения устойчивого процесса продольного разделения.

3. Определить величину продольной силы действующей на неприводное делительное устройство со стороны прокатной клетки для использования при прочностных расчетах деталей неприводного делительного устройства.

4. Оценить возможность и условия прокатки-разделения и компоновку оборудования при разделении строенного сочлененного профиля неприводным устройством за 15 клетью.

При решении этих важных вопросов воспользовались полученными теоретическими зависимостями и экспериментальными исследованиями процесса прокатки – разделения, обобщенными в блок – схеме алгоритма поиска рациональных режимов (рисунок 3.23).

Расчеты проводились исходя из условий прокатки на непрерывном мелкосортном стане 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» арматурных профилей №8, №10, №12. Толщины перемычки рассматривались в соответствии с рекомендациями, имеющимися в литературе [118, 128, 129], согласно которым эта величина должна составлять 0,14 – 0,31 высоты калибра или для арматуры №8 – №12 это 1 – 5 мм. Полученные расчетные данные, приведены на рисунках 4.5 – 4.7, где цифрой 1 обозначено продольное усилие, обеспеченное резервом сил трения клетки, формирующей сочлененный профиль, 2 – продольное усилие, необходимое при разделении неприводным устройством разрывом, 3 - передавливанием. Приведенные на рисунках 4.4 – 4.6 результаты предельно допустимые показывающие область осуществимости изучаемого процесса. При выборе технологических режимов процесса продольного разделения необходимо выполнять условие  $Q_1/Q_2 > 1,2 - 1,3$ , что будет гарантировать выполнение условия (2.1). Анализ рассмотренных способов разделения позволяет сделать следующие заключения: при разделении передавливанием продольное усилие в большей степени, чем разрывом, зависит от толщины перемычки и при больших значениях толщины перемычки превышает усилие, необходимое на разрыв. При передавливании перемычки существенное влияние на стабильность процесса оказывает колебание толщины перемычки учесть, которое практически невозможно. Данное обстоятельство делает крайне затруднительным, а в некоторых случаях невозможным разделение передавливанием в промышленных условиях. При разделении разрывом толщина перемычки в меньшей степени влияет на продольную силу, чем при

передавливании.

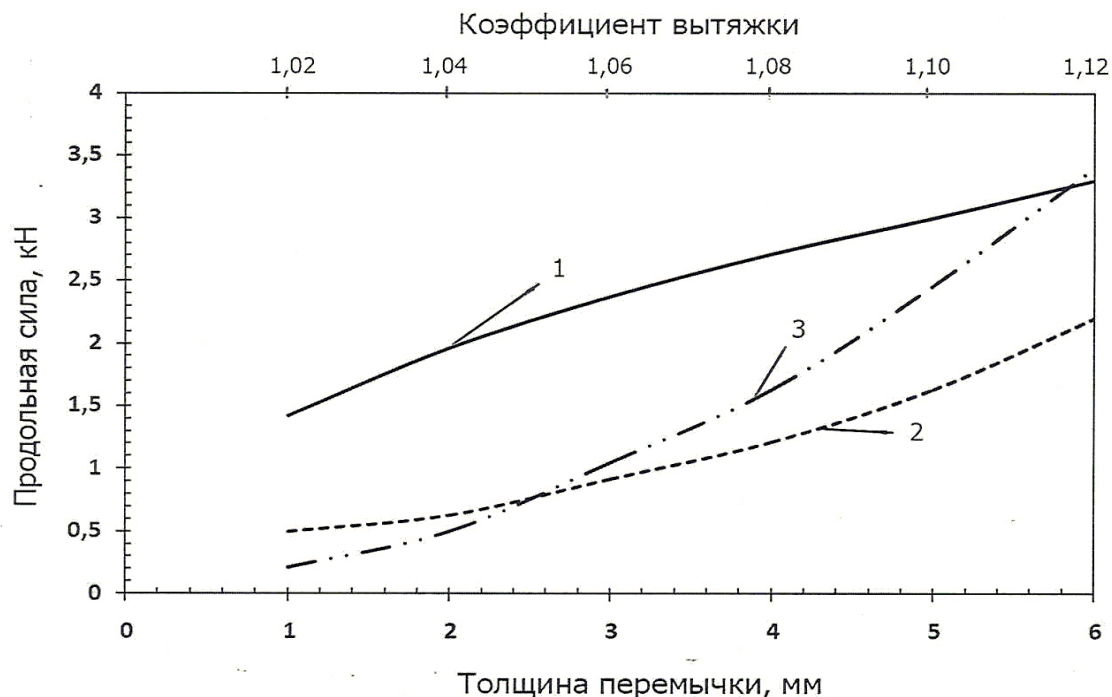


Рисунок 4.4 – Область осуществимости процесса прокатки – разделения для арматуры №8 в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

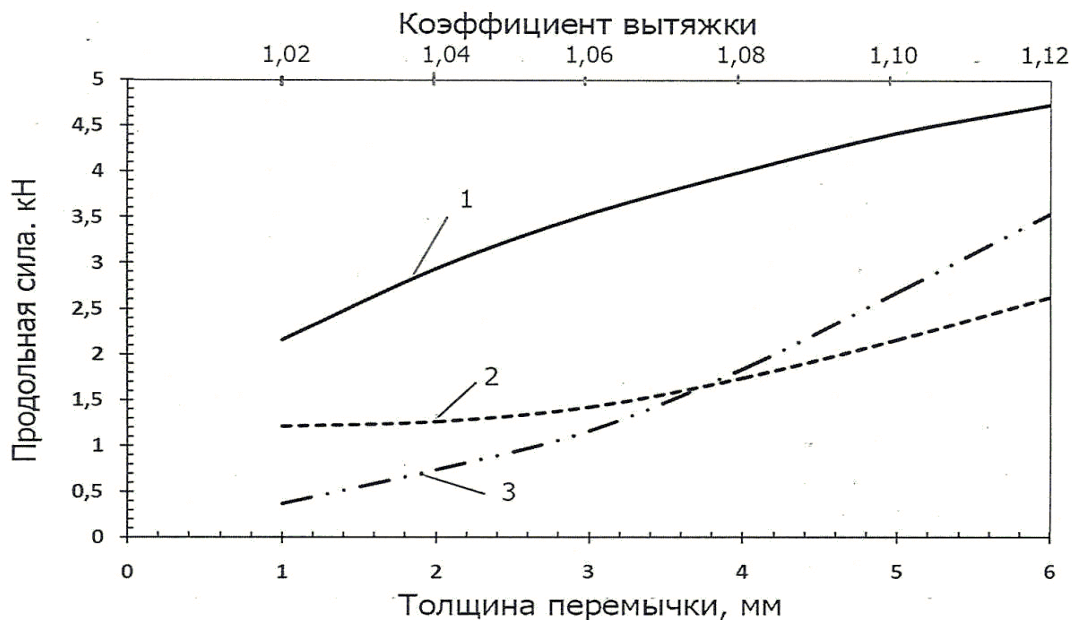


Рисунок 4.5 – Область осуществимости процесса прокатки – разделения для арматуры №10 в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»



Рисунок 4.6 – Область осуществимости процесса прокатки – разделения для арматуры №12 в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Большое влияние оказывает номер арматуры, что связано с необходимостью изгиба разделяемых профилей при небольшом плече. Практически организовать продольное разделение разрывом, настроить неприводное делительное устройство значительно проще, чем при разделении передавливанием, что делает предпочтительным в рассматриваемых условиях разделение разрывом.

Еще один фактор, требующий оценки, это допустимое расстояние между очагом деформации клетки, формирующей сочлененный профиль, и неприводным делительным устройством. Эта информация необходима для определения компоновки оборудования и уточнения области осуществимости технологии прокатки – разделения применительно к условиям стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Результаты проведенных расчетов представлены на рисунках 4.7, 4.8. Из полученного материала следует, что наиболее сложно обес-

печить продольную устойчивость для арматуры №8, №10. В этом случае необходимо ограничиться толщиной перемычки в 1 – 1,5 мм.

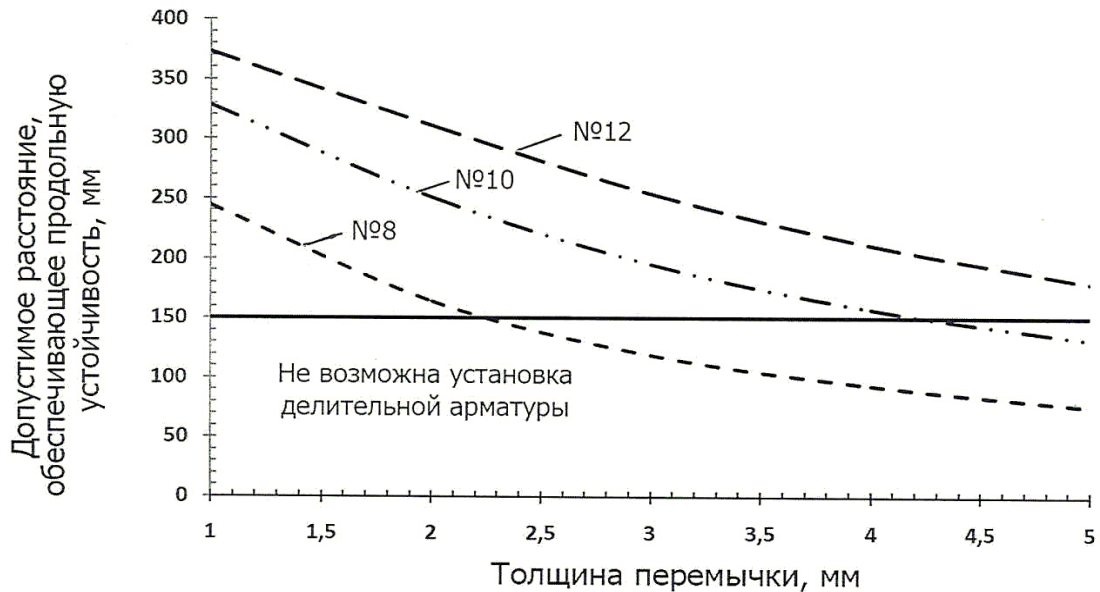


Рисунок 4.7 – Условия продольной устойчивости в промежутке между 15 клетью и роликами делительной арматуры при разделении передавливанием на непрерывном мелкосортном стане 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

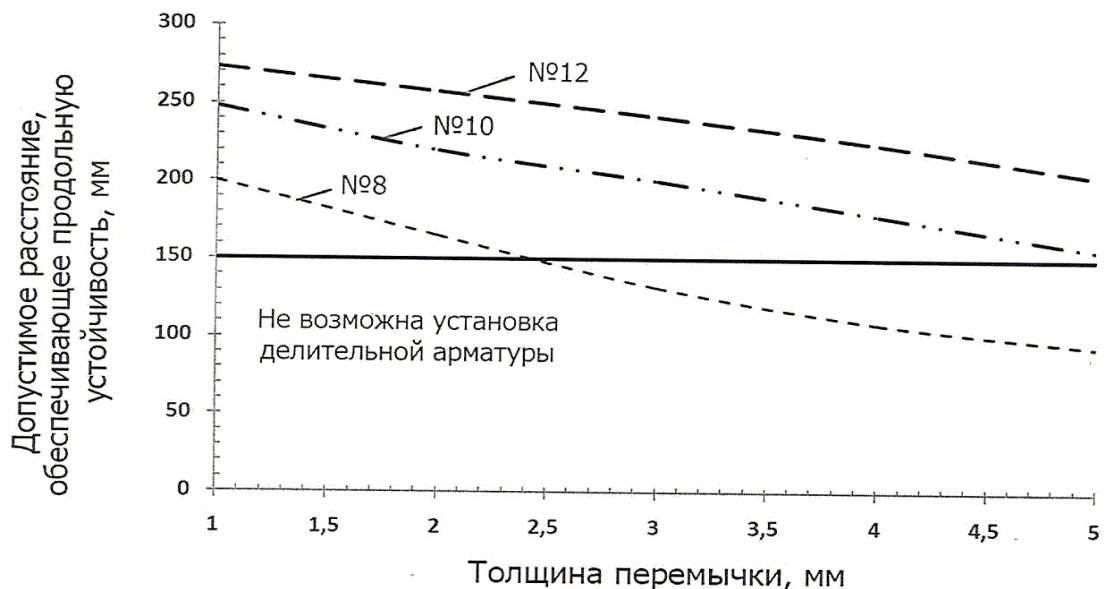


Рисунок 4.8 – Условия продольной устойчивости в промежутке между 15 клетью и роликами делительной арматуры при разделении разрывом на непрерывном мелкосортном стане 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Согласно проведенным расчетам, в рассматриваемых условиях допустимое расстояние от линии, соединяющей центры валков, до роликов делительного устройства, обеспечивающее условие устойчивости полосы, должно находиться в пределах для арматуры №8 150 – 220 мм, №10 – 150 – 240 мм, №12 – 150 – 270 мм. Исходя из условий унификации компоновки делительного инструмента, рекомендованным расстоянием следует считать не более 220 мм. Величина рекомендованного расстояния может быть при необходимости увеличена, но при этом следует предусмотреть в выводной делительной арматуре дополнительные удерживающие от потери продольной устойчивости элементы.

Установлено, что область осуществимости технологии прокатки - разделения с использованием неприводного делительного устройства в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» определяется величиной продольной силы, обеспеченной резервом сил трения 15 клетки, условиями продольной устойчивости и численным значением силы, необходимой для продольного разделения сочлененного профиля. Согласно проведенным исследованиям, область осуществимости процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного инструмента для арматурных профилей №8, №10, №12 в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» следует считать коэффициент вытяжки в пятнадцатой клетки не менее 1,02, толщину соединительной перемычки не более 2 мм, расстояние между линией соединяющей центры валков пятнадцатой клетки и роликами делительного устройства не более 220 мм, в качестве способа разделения предпочтительно использовать разрыв. При проектировании делительного инструмента, прочностных расчетах его деталей необходимо знать величину максимальной продольной силы, требуемой для разделения. С учетом проведенных расчетов максимальная величина продольной силы не выходит за пределы 4 кН. Данную величину при пятикратном запасе рекомендовано использовать в прочностных расчетах деталей делительного устройства.

Рассмотренные выше условия продольного разделения соответствуют случаю прокатки сдвоенных круглых профилей. Представляет интерес освоение прокатки – разделения строенных сочлененных профилей в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Приведенные в диссертации формулы позволяют провести анализ особенностей прокатки – разделения строенных профилей для получения арматурных профилей №8, №12. Рассмотрим значения продольной силы, обеспеченной резервом сил трения клетки, формирующей строенный сочлененный профиль, и продольную силу, необходимую для разделения соединительных перемычек. Результаты проведенных аналитических исследований показаны на рисунках 4.9, 4.10.

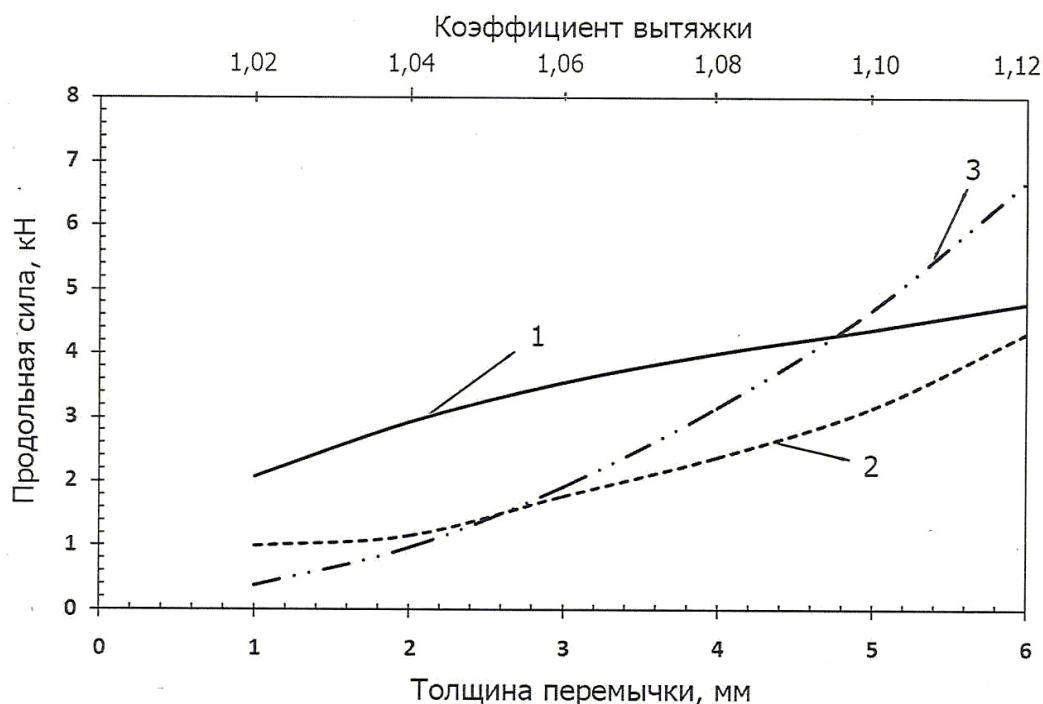


Рисунок 4.9 – Область осуществимости процесса прокатки – разделения строенных арматурных профилей №8 в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Из полученного материала следует, что при разделении строенных профилей за счет увеличения активной площади в очаге деформации про-

дольная сила, обеспеченная резервом сил трения прокатной клетки, увеличивается в 1,5 раза. Однако при этом усилие, необходимое при разделении одновременно двух перемычек, пропорционально увеличивается. Такое изменение соотношения сил затрудняет процесс прокатки – разделения и требует либо снижение допустимой толщины перемычки, либо увеличение коэффициента вытяжки в клетке, формирующей строенный профиль. Таким образом, при освоении прокатки – разделения строенного профиля соотношение продольных сил, участвующих в разделении, хуже, чем при разделении сдвоенных профилей. Для обеспечения стабильности процесса прокатки – разделения строенного профиля необходимо снизить толщину перемычки до 1 мм и увеличить коэффициент вытяжки в 15 клетки. Рассмотренные способы разделения передавливанием или разрывом показали преимущества разделения разрывом.

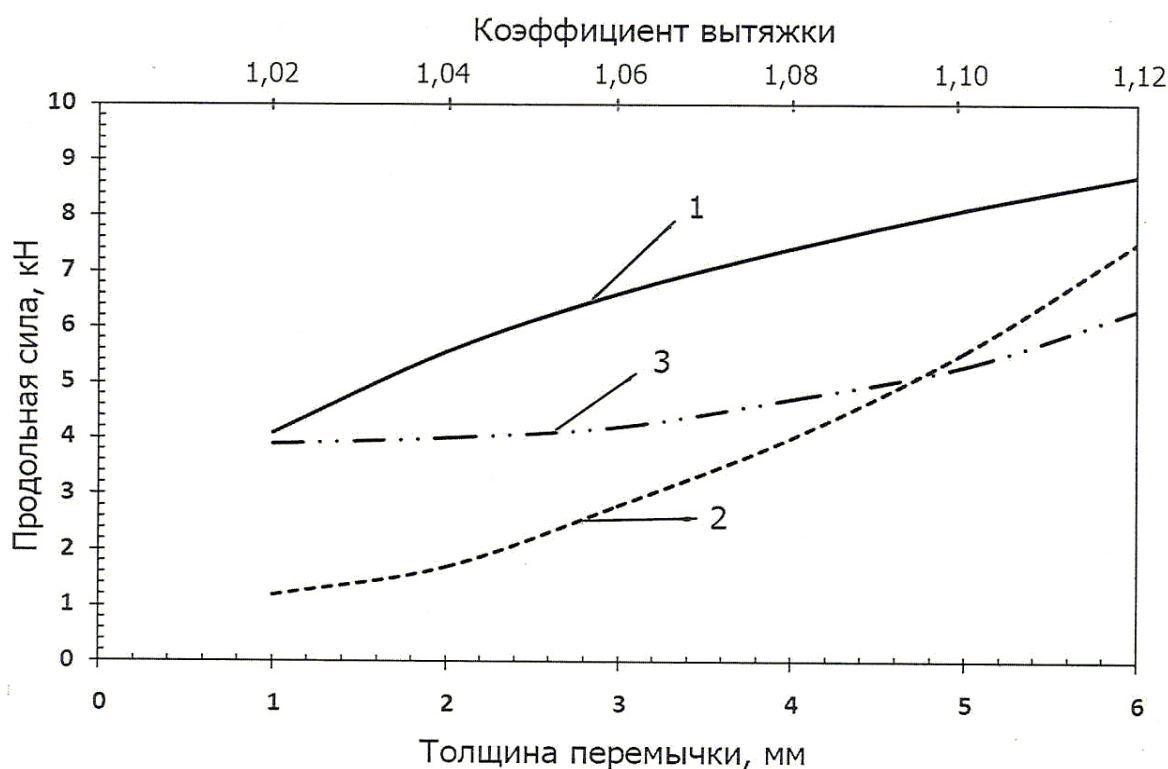


Рисунок 4.10 – Область осуществимости процесса прокатки – разделения строенных арматурных профилей №12 в условиях непрерывного мелко-сортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

При рассмотрении вопроса возможности использования строенной заготовки для реализации процесса прокатки – разделения в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» необходимо рассмотреть возможность обеспечения продольной устойчивости при разделении и оценить максимально допустимое расстояние между прокатной клетью, формирующей окончательный строенный профиль, и неприводным делительным устройством. Как показал опыт разделения сдвоенных профилей, наиболее сложно добиться продольной устойчивости на мелких профилях арматура №8, №10. Рассмотрим влияние толщины перемычки и способа разделения на максимально допустимое расстояние между клетью и неприводным делительным устройством при одновременном разделении трех сочлененных профилей арматуры №8, №12. Результаты проведенных аналитических исследований показаны на рисунках 4.11, 4.12.

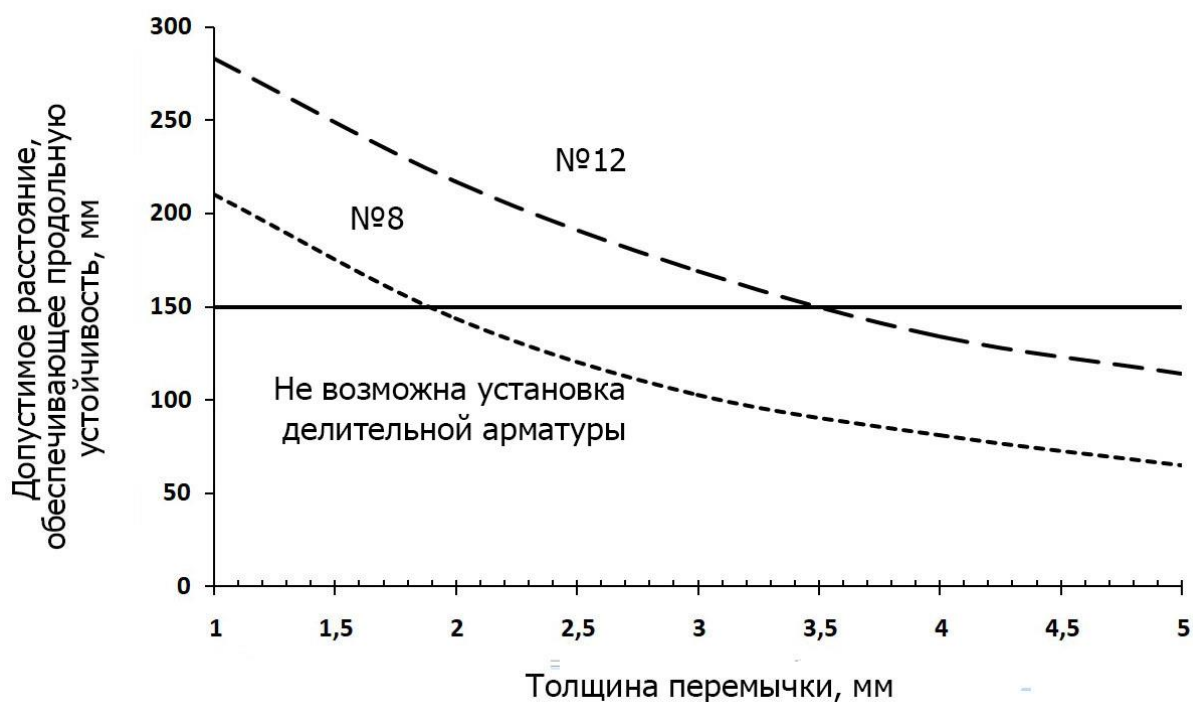


Рисунок 4.11 – Условия продольной устойчивости в промежутке между 15 клетью и роликами делительного устройства при разделении строенных арматурных профилей передавливанием на непрерывном мелкосортном стане 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Согласно полученным данным, обеспечить продольную устойчивость при использовании строенных профилей сложнее, чем при сдвоенных. Объясняется такое положение большим усилием, необходимым для разделения, что в целом уменьшает допустимое расстояние.

Согласно результатам расчетов, при использовании строенной заготовки для арматуры №8 при разделении разрывом перемычки толщиной 1 мм продольная устойчивость будет выполняться при максимальном удалении делительного инструмента на расстояние 170 мм. Выполнить данное условие достаточно трудно. В качестве решения можно предложить использование в данном случае удерживающих направляющих. Для строенных профилей с толщиной перемычки 1 мм №10, 12 допустимое расстояние не должно превышать 200 – 210 мм.

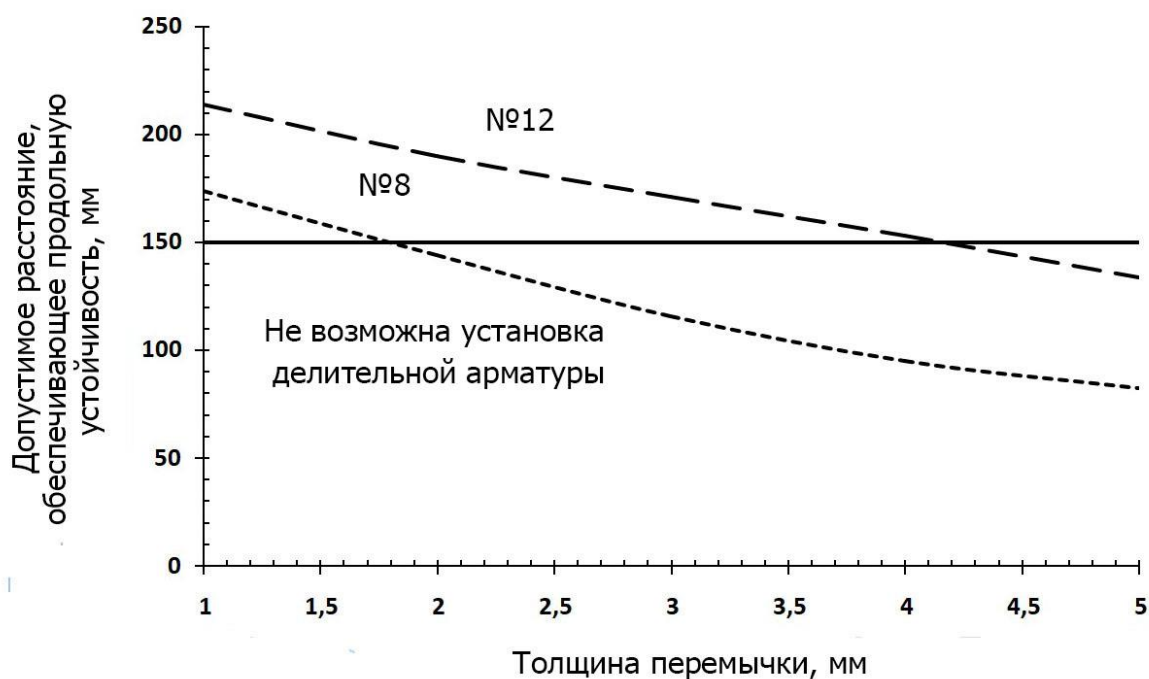


Рисунок 4.12 – Условия продольной устойчивости в промежутке между 15 клетью и роликами делительного устройства при разделении строенных арматурных профилей разрывом на непрерывном мелкосортном стане 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Необходимо учесть при расчете деталей крепления делительной арматуры двукратное увеличение продольной силы, используемой при разделе-

нии строенного профиля. С учетом проведенных расчетов максимальная величина продольной силы не выходит за пределы 8 – 10 кН. Данную величину при пятикратном запасе рекомендовано использовать в прочностных расчетах деталей делительного устройства.

Проведенные исследования процесса прокатки – разделения позволили сформулировать рекомендации по совершенствованию технологии получения арматурных профилей №8, №10, №12 в условиях непрерывного мелко-сортного стана 250-1 АО ЕВРАЗ ЗСМК. Ожидаемый экономический эффект от разработанных мероприятий и рекомендаций, подтвержденный соответствующим актом, позволит материальные затраты и время не предвиденных простоев, и составит 9,1 млн. рублей в год (Приложение А).

Результаты исследований используются в учебном процессе при чтении лекций, в курсовом проектировании, в выпускных квалификационных работах при подготовке бакалавров по направлению 22.03.02 Metallургия (Приложение Б).

Результаты исследований приведены в работах [130, 126, 106, 127].

## **Выводы**

1. Установлено, что при реализации процесса прокатки – разделения в условиях непрерывного мелко-сортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» основным ограничивающим фактором при получении арматурных профилей №8, 10, 12 является условие продольной устойчивости.

2. Определены допустимые пределы расстояния между клетью, формирующей сдвоенный сочлененный профиль, и неприводным делительным инструментом для арматуры №8 150 – 220 мм, №10 150 – 240 мм, №12 150 – 270 мм.

3. Установлено, что стабильность процесса прокатки – разделения в чистовой группе клетей непрерывного мелко-сортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» будет обеспечена при коэффициенте вытяжки в 15 клетки, формирующей окончательный сочлененный профиль, не менее 1,02, при

толщине перемычки не более 2 мм, допустимом расстоянии между 15 клетью и делительным устройством не более 220 мм.

4. Показана возможность прокатки и разделения на непрерывном мелкосортом стане 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» строенных арматурных профилей №8, 10, 12 по режимам: коэффициент вытяжки не менее 1,02, толщина соединительной перемычки 1 мм, для арматуры №10, 12 допустимое расстояние, обеспечивающее продольную устойчивость, 150 – 210 мм, при прокатке арматуры №8 необходимо предусмотреть дополнительную удерживающую от потери устойчивости валковую арматуру.

5. Продольная нагрузка на делительную арматуру при разделении сдвоенных профилей 4 кН, строенных 8 - 10 кН.

## Основные выводы и результаты работы

1. Получены экспериментально проверенные математические зависимости, для определения величины продольной силы, обеспеченной резервом сил трения в очаге деформации клетки, формирующей сочлененные профили, при помощи которых установлено, что увеличение угла захвата, коэффициента трения и коэффициента вытяжки увеличивают продольную силу, обеспеченную резервом сил трения в очаге деформации клетки, формирующей сочлененный профиль. Из рассмотренных форм калибров наибольшая величина продольной силы имеет место в сочлененных квадратных калибрах.

2. Предложены теоретические зависимости для нахождения силы, необходимой при разделении неприводным инструментом сочлененных профилей способами передавливания и разрыва. Установлено, что при разделении передавливанием форма и площадь поперечного сечения сочлененных профилей не оказывает влияние на необходимое продольное усилие разделения. На продольное усилие при разделении разрывом оказывает влияние форма и площадь поперечного сечения сочлененного профиля. При увеличении площади поперечного сечения существенно увеличивается продольная сила поэтому разделение разрывом целесообразно использовать в чистовых группах клетей мелкосортных станов.

3. На основании проведенных исследований предложены зависимости для определения допустимого расстояния между клетью, формирующей сочлененный профиль и делительным устройством, гарантирующие продольную устойчивость и необходимые при выборе компоновки оборудования. Установлено, что при определении допустимого расстояния между клетью и неприводным делительным инструментом коэффициент приведения длины равен 0,7.

4. Разработан алгоритм для определения области осуществимости процесса прокатки – разделения и поиска рациональных режимов формоизменения и разделения. Доказано, что при разделении передавливанием рацио-

нальное отношение углов в месте раздела к углу при вершине делительного ролика должно составлять 0,67, а при разделении разрывом 1,2 – 1,6.

5. Разработаны рекомендации по выбору рациональных режимов формоизменения и разделения сочлененных профилей для арматурных профилей №8, №10, №12 в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Установлено, что при формировании сдвоенных сочлененных профилей коэффициент вытяжки в клетки должен быть не менее 1,02, толщина соединительной перемычки не более 2 мм, расстояние между клетью и неприводным делительным инструментом не более 220 мм. При разделении строенных профилей коэффициент вытяжки не менее 1,02, толщина перемычки не более 1 мм, для арматурных профилей №10, №12 допустимое расстояние, обеспечивающее продольную устойчивость не менее 210 мм, для арматурного профиля необходимо предусмотреть дополнительное удерживающее в продольном направлении устройство. Разработанные рекомендации позволяют снизить количество брака в недокатах и время не предвиденных простоев основного оборудования, что позволяет получить экономический эффект 9,1 млн. рублей в год, подтвержденный соответствующим актом. Результаты исследований используются в учебном процессе при чтении лекций, в курсовом проектировании, в выпускных квалификационных работах при подготовке бакалавров по направлению 22.03.02 Metallургия.

## Список литературы

1. Прокатка-разделение. Тенденции развития технологии и оборудования / С. М. Жучков, В. В. Филиппов, Л. В. Кулаков [и др.] // Черная металлургия : Бюллетень научно-технической и экономической информации ОАО Центральный научно-исследовательского института информации и технико-экономических исследований черной металлургии. – Москва. - 2002. - вып. 7. - С. 9-24.
2. NKK to construct bar mills featuring slit-rolling technology.//NKK news, 1977, V17, N6. p. 4-6.
3. Ioneoka, H. New slit-rolling technology for steel bar / H. Ioneoka // Seaisi quarterly. – 1985. - V.14. - №4. - P. 50-61,66,67.
4. Acosta, Osvaldo. A multiple rolling process / Osvaldo Acosta // Iron and Steel. – 1967. - V. 40. - №11. - P. 447-449.
5. Маншилин, А.Г. Эффективность технологии многоручьевой прокатки-разделения в зависимости от параметров оборудования / А.Г. Манинский, В.С. Солод // Сталь. – №8. – 67-68 с.
6. Matsuo, G. The latest Technology of Multi-slit Rolling / G. Matsuo, M. Suzuki // SEA ISI Quartely. - 1995. - №3. - P. 49-58.
7. Освоение технологии прокатки «слиттинг-процесс» в четыре нитки арматурной стали №12 на непрерывном мелкосортном стане 320 РУП «БМЗ» / Н.В. Андрианов, А.В. Русаленко, Н.И. Анелько [и др.] // Литье и металлургия. 2005. – №2 (34). – С. 20-22.
8. Совершенствование технологии производства арматурных профилей малых сечений, прокатанных многоручьевой прокаткой-разделением / С.М. Жучков, В.Г. Раздобреев, П.В. Токмаков [и др.] // Литье и металлургия. – 2009. – №3. – С. 292-296.
9. Ефимов, Н.А. Об оценке организационных резервов повышения эффективности использования действующих сортовых станов при освоении технологии многоручьевой прокатки-разделения / Н.А. Ефимов, А.Р. Фастыковский // Производство проката. – 2015. – №4. – С. 44-47.

10. Шульгин, Г.М. Создание и промышленная реализация высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, основанных на применении процесса – многоручьевая прокатка-разделение / Г.М. Шульгин, А.Г. Маншилин, С.М. Жучков // *Металл и литье Украины*. – 2003. – №3–4. – С. 3-50.

11. Барановский, Д.С. Совершенствование прокатки по «слиттинг-процессу в контрольном калибре стана 320 ОАО «БМЗ» / Д.С. Барановский // *Исследования и разработки области машиностроения, энергетики и управления : Материалы XXI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях, Гомель, 22-23 апреля 2021. Том Часть 1. – Гомель: Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, 2021. – С 93–97.*

12. John Moor Re – rolling of rails. *MVM May 1986*. с. 97 – 99.

13. Бахтинов, Ю.Б. О целесообразности прокатки изношенных рельсов в сортовые профили / Ю.Б. Бахтинов // *Производство проката*. – 2000. – №7. – С. 2 – 4.

14. Многоручьевая прокатка-разделение. Научные и технологические основы / В.М. Клименко, С.П. Ефименко, В.Ф. Губайдулин, Г.М. Шульгин. М.: *Металлургия*, 1987 - 168 с.

15. Sharp I.D. Meeting the challenge of small rolling mill design.//*Iron and steel International*, 1979, V52, N2. P. 13-16.

16. Разработка промышленной технологии двухручьевой прокатки-разделения сортовых профилей на мелкосортных станах : Отчет о НИР : Уральский НИИ черных металлов - Свердловск, 1986. 114 с.

17. Клименко, В. М. Производство проката способом прокатки – разделения / В. М. Клименко, В. Ф. Губайдулин, Г. М. Шульгин [и др.] // *Черная металлургия : Бюллетень научно-технической и экономической информации ОАО Центральный научно-исследовательского института информации и технико-экономических исследований черной металлургии*. – Москва. – 1982. – вып. 23. – С. 3 – 17.

18. Следнев, В. П. Спаренная прокатка сортовых профилей / В. П. Следнев // Москва: Metallurgiya, 1988. - 168 С.
19. Теория и практика процесса многоручьевой прокатки-разделения / Г. М. Шульгин, О. В. Дубина, В. Ф. Губайдуллин [и др.] // Севастополь : «Вебер», 2003. – 622 с.
20. Процесс прокатки-разделения с использованием неприводных делительных устройств. Теория и практика / С. М. Жучков, А. П. Лохматов, Н. В. Андрианов, В. А. Маточкин // Украина-Белорусь: Пан Пресс, 2007. – 364 с.
21. Исследование формоизменения плоской широкой заготовки для продольного разделения в калибрах / Ю.Б. Бахтинов, Ф.Р. Карелин, В.Ф. Чопоров [и др.] // Производство проката. – 2007. - №6. – с. 19 – 21.
22. Hewitt E.C. Developments in rolling mill technology Jn: Steel Industrial Eighties. Processes International Conference, Amsterdam, 1979, p. 150 – 156.
23. Шиниси, Г. Продольная резка непрерывнолитого горячего сляба с помощью валков. – Тэцу то Хагаэ, 1980, т 66 – №11– С. 987.
24. Двухручьевая проката-разделение арматурной периодической стали / Г. М. Шульгин, В.Д. Гладышев, М.И. Костюченко [и др.] // Черная металлургия : Бюллетень научно-технической и экономической информации ОАО Центральный научно-исследовательского института информации и технико-экономических исследований черной металлургии. – Москва. - 1986. - вып. 24. - С.20-21.
25. Производство арматурной периодической стали методом двухручьевой прокатки-разделения / Г. М. Шульгин, И. И. Овсяк, В. И. Руденко [и др.] // Черная металлургия : Бюллетень научно-технической и экономической информации ОАО Центральный научно-исследовательского института информации и технико-экономических исследований черной металлургии. – Москва. - 1985. - вып. 17. - С.56-57.
26. Опытнo-промышленное исследование двухручьевой прокатки-разделения сортовых профилей / Г. М. Шульгин, В. П. Морозов, И. И. Овсяк [и др.] // Новые технологические процессы прокатки и получения холоднока-

таного листа с покрытиями: тем. сб. науч. трудов ЦНИИчермета. - Москва. - 1985. - С. 9-13.

27. Экспериментальное исследование прокатки заготовок в многоручьевом шахматном калибре / В. М. Клименко, Ю. М. Чуманов, Г. М. Шульгин, [и др.] ; Донецкий политехн. ин-т. - Донецк, 1979. - 25 с. Деп. в ин-те "Черметинформация" 19.09.1979, № 739.

28. А.С. 527218 СССР Способ прокатки заготовок / Шум В.Б., Чумаков Ю. М., Погоржельский В.И. [и др.] Б.и 1977 №33 с. 22.

29. Совершенствование технологии сдвоенной прокатки арматурных профилей на стане 320/150 / С.М. Жучков, А.Н. Бондаренко, В.Н. Асанов, В.Ф. Дышлевич // Сталь. – 1994. – №2. – С. 48 – 51.

30. Жучков, С.М. Особенности технологической схемы процесса трехниточной прокатки – разделения на мелкосортно – проволочном стане 320/150 Белорецкого металлургического завода / С.М. Жучков // Металлург. – 2001. – №1. – С. 46 – 47.

31. Совершенствование технологии и оборудования для реализации процесса прокатка-разделение / В.И. Тимошпольский, Н.В. Андрианов, С.М. Жучков [и др.] // Литье и металлургия. – 2004. – №1 (29). – С. 22-29.

32. Научно-исследовательские и внедренческие работы специалистов сортопрокатного отдела на металлургических предприятиях / Г.М. Шульгин, Д.П. Кукуй, В.С. Солод [и др.] // Металл и литье Украины. – 2006. – №7-8. – С. 61-69.

33. Шульгин, Г.М. Теория и практика нетрадиционного процесса - прокатка-разделение / Г.М. Шульгин, А.Г. Маншилин, С.М. Жучков // Металл литье Украины. – 2004. – Спецвыпуск. – 50 с.

34. Кукуй, Д.П. Расширение сортамента шахматного стана 351-1 ОАО «МакМК» применением технологии прокатки-разделения / Д.П. Кукуй, В.С. Солод, С.П. Нефедьев // Металл и литье Украины. – 2003. – №6. – С. 52-53.

35. Нечепоренко, В.А. Освоение процесса прокатка-разделения на стане 350-2 ЗАО «Макеевский металлургический завод» / В.А. Нечепоренко, С.П.

Нефедьев, А.С. Нефедьев // Металл и литье Украины. – 2005. – №11-12. – С. 32-35.

36. Дмитриев, Е.С. Разработка вариантов реконструкции устаревших линейных сортопрокатных станов / Е.С. Дмитриев, В.С. Солод, С.П. Нефедьев // Сталь. – 2006. – №8. – С. 12-15.

37. Промышленные исследования технологии многоручьевого прокатки / В.П. Следнев, С.П. Ефименко, В.М. Клименко, [и др.] // Металлург. – 1982. – №4. – С. 26 – 28.

38. Формоизменение металла при прокатке в двухручьевых разрезных калибрах / Г.П. Перунов, В.К. Смирнов, Ю.В. Инатович, В.В. Лиманкин / Производство проката. – 2006. – №6. – С. 8-19.

39. Технология прокатки-разделения арматурной стали №10 на мелко-сортно-проволочном стане 320/150 ОАО «Амурметалл» / Г. П. Перунов, В. К. Волков, С. М. Балдин, С.А. Чиж // Черная металлургия : Бюллетень научно-технической и экономической информации ОАО Центральный научно-исследовательского института информации и технико-экономических исследований черной металлургии. – Москва. – 2006. - №11. – С. 65-67.

40. Технология прокатки-разделения арматурной стали №12 на мелко-сортно-проволочном стане 320/150 ОАО «Амурметалл» / Г .П. Перунов, В. В. Лиманкин, К. В. Волков, [и др.] // Черная металлургия : Бюллетень научно-технической и экономической информации ОАО Центральный научно-исследовательского института информации и технико-экономических исследований черной металлургии. – Москва. – 2006. - №9. – С. 54-57.

41. Освоение технологии прокатки-разделения арматурной стали на мелко-сортно-проволочном стане 320/150 ОАО «Амурметалл» / Г.П. Перунов, В.В. Лиманкин, К.В. Волков [и др.] // Производство проката. – 2006. – №10. – С. 16-19.

42. Внедрение технологии прокатки-разделения арматурных профилей на стане 320/150 / Г.П. Перунов, С.А. Хохлов, К.В. Волков [и др.] // Сталь. – 2010. – №5. – С. 90-92.

43. Исследование параметров процесса прокатки-разделения при производстве арматурных профилей на стане 320 РУП «БМЗ» / С.М. Жучков, В.А. Маточкин, Д.Н. Андрианов [и др.] // Литье и металлургия. – 2008. – №2 (38). – С. 56-62.

44. Нефедьев, А.С. Развитие способа многоручьевого продольного разделения раската при производстве сортовых профилей / А.С. Нефедьев, С.П. Нефедьев, Я.Е. Бейгельзимер // Металлургия и горнорудная промышленность. – 2009. – №6 – С. 50-52.

45. Горячая абразивная резка // Черные металлы. – 1984. – №2. – С. 3 – 6.

46. Starkov, N. V. Performance criteria slitting-process / N. V. Starkov, Y. L. Bobarykin // Foundry production and metallurgy - 2016. - № (1) 82. - P. 61-65.

47. Starkov, N. V. Choosing the Slitting Method and the Profile of the Slitting Rolls for Rolling and Slitting / N. V. Starkov, Y. L. Bobarykin // Metallurgist - 2015. - Volume 59 - Issue 5-6 P. 390-395.

48. Wisselink, H.H. 3D FEM simulation of stationary metal forming processes with applications to slitting and rolling / H. H. Wisselink, J. Huetink // Journal of Materials Processing Technology - 2004. - №148 - P. 328-341.

49. Matsuo, G. Suzuki M. The latest Technology of Multy – slit Rolling / G. Matsuo // SEA ISI Quaterly. 1995 - №3 - P. 49 – 58.

50. Stefanik, A. Slitting criterion for various rolling speeds in MSR rolling process / A. Stefanik // AMME - V. 27 - March 2008. - P. 91-94.

51. Palmer, W. Slit Rolling technology / W. Palmer // World Steel & Metalworking. - 1984-1985. - P.147-149.

52. Ioneoka H. New slit-rolling technology for steel bare / Seaisi quarterly. - 1985. Vol.14. - N4. - P. 50 -61, 66, 67.

53. Разработка технических и технологических решений для совершенствования процесса прокатки-разделения на стане 370 ПАО «ММК» / С.А. Левандовский, О.Н. Тулупов, А.Б. Моллер [и др.] // Калибровочное бюро. – 2021. – Вып. 19. - ISSN 2308-6440 : [сайт]. – URL: - <http://www.passdesign.ru>

54. Satoh, R. The rolling of bar products using the slit-rolling process / R. Satoh // Nippon Kokan Technical Report – 1980. - N30. - P. 53-60.

55. Усовершенствование схемы прокатки при двухниточном слиттинг-процессе арматуры №20 в условиях РУП «БМЗ» / М.А. Муриков, А.В. Русаленко, В.В. Гордиенко, А.С. Саваш // Литье и металлургия. – 2011. – №2 (60). – С. 132-133.

56. Совершенствование технологии и оборудования для реализации процесса прокатки – разделение / В.И. Тимошпольский, Н.В. Андрианов, С.М. Жучков, [и др.] // Литье и металлургия. – 2004. - №1. – С. 22 – 29.

57. Старков, Н.В. Определение размеров инструмента разделения в слиттинг-процессе для сортовой непрерывной прокатки / Н.В. Стариков // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2016. – №22. – С. 120-130.

58. Старков, Н.В. Критерии эффективности слиттинг-процесса / Н.В. Старков, Ю.Л. Бобарикин // Литье и металлургия. – 2016. – №1(82). – С. 61-65.

59. Непрерывный мелкосортно-проволочный стан 320/150 Беларусского металлургического завода / А.П. Лохматов, С.М. Жучков, С.М. Кулаков [и др.] // Сталь. – 1987. – №7. – С.41-46.

60. Освоение производства проката на новом сортовом стане 370 ОАО ММК / А.В. Титов, В.Л. Носов, А.В. Гасилин [и др.] // Производство проката. – 2007. – №5. – С.33-37.

61. Берковский, В.С. Прокатка лезвия составного лемеха из стали ХКФ1/ В.С. Берковский, М.Н. Лобарев // Сталь. – 1962. – №10. – С. 919 – 921.

62. Писаренко, Ф.А. Прокатка сортовых профилей в сдвоенном виде/ Ф.А. Писаренко, В.П. Следнев, А.В. Яковенко // Сталь. – 1981. – №5. – С. 45 – 50.

63. Клименко, В.М. Исследование кинематических условий продольной прокатки в двухручьевых калибрах / В.М. Клименко / Известия вузов. Черная металлургия. – 1985. – №8. – С. 50-55.

64. Маншилин, А. Г. Оптимизация технологии прокатки-разделения арматурных профилей методом контролируемого разрыва : Автореферат дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук : 05.03.05 / Маншилин Александр Гейниевич ; Донецкий национальный технический ун-т. - Донецк, 2003. - 20 с.

65. Солод, В.С. Теоретический анализ различных модификаций способа разрыва при продольном разделении раскатов в многоручьевых калибрах / В.С. Солод, А.Г. Маншилин, В.А. Нечепоренко // *Металлургическая и горно-рудная промышленность*. – 2002. – №8-9. – С.273-277.

66. Stefanik, A. Slitting criterion for various rolling speeds in MSR rolling process / *AMME*, V. 27. - March 2008. - P. 91-94.

67. Математическое моделирование процесса прокатки арматурных профилей с продольным разделением полосы / Х. Дыя, С. Мруз, А. Ковалек, [и др.] // *Труды шестого конгресса прокатчиков*. Т.1. (Липецк, 18-21 октября 2005 г.) – Москва : МОО «Объединение прокатчиков», 2005. - С. 266-274.

68. Старков, Н.В. Критерии эффективности слиттинг-процесса / Н.В. Старков, Бобарикин Ю.Л. // *Литье и металлургия*. – 2016. – №1 (82). — С. 61-65.

69. Волков, К.В. Прокатка разделением / К.В. Волков, М.В. Филиппова, В.Н. Перетятыко // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2012. – №6. – С. 52.

70. Волков, К.В. Совершенствование технологии прокатки-разделения арматурного профиля на мелкосортных станах : Автореферат дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. 05.16.05 / Волков Константин Владимирович ; Сибирский гос. индуст. ун-т - Новокузнецк, 2012. - 18 с.

71. Шувяков, И.В. Разработка методики определения сил, возникающих в неприводном делительном устройстве при реализации процесса прокатки-разделения / И.В. Шувяков, С.М. Жучков, Л.В. Кулаков // *Металлургическая и горно-рудная промышленность*. – 2002. – №8-9. – С. 270-273.

72. Анализ силового воздействия элементов калибра и раската при использовании кантующих квадратных калибров в процессе прокатки-разделения / С.М. Жучков, А.Н. Бондаренко, А.А. Горбанов [и др.] // *Прокатное производство*. – 2003. – №11. – С. 10-15.

73. Анализ силового воздействия элементов калибра и раската при использовании ромбических кантующих калибров в процессе прокатки-разделения / С.М. Жучков, А.Н. Бондаренко, А.А. Горбанов, Б.Н. Колосов, А.П. Киселев // Прокатное производство. – 2003. – №10. – С. 20-25.

74. Методика расчета усилий в неприводном делительном устройстве / И. В. Шувяков, С. М. Жучков, Л. В. Кулаков, А. Ю. Оробцов // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. научн. тр. ИЧМ НАН Украины. – Киев : Изд-во Наукова думка. – 2001. – Вып.4. – С. 145-151.

75. Применение нетрадиционных технологических решений при прокатке на сортовых станах заготовок увеличенного сечения / С.М. Жучков, Э.В. Сивак, И.И. Букреев [и др.] // Сталь. – 2001. – №1. – С. 39-42.

76. Жучков, С. М. Математическая модель процесса многоручьевого прокатки-разделения с использованием неприводного инструмента в линии непрерывного прокатного стана / С. М. Жучков, Д. Г. Паламарь, М. Н. Штода // Черная металлургия : Бюллетень научно-технической и экономической информации ОАО Центральный научно-исследовательского института информации и технико-экономических исследований черной металлургии. – Москва. – 2009. - №9. – С. 58-59.

77. Перунов, Г. П. Разработка и внедрение оптимальной технологии прокатки-разделения арматурной стали на мелкосортно-проволочном стане 320/150 / Автореферат дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук : 05.16.05 / Перунов Григорий Павлович ; Ур. гос. техн. ун-т. - Екатеринбург, 2008. - 24 с.

78. Влияние интенсификации многоручьевого прокатки на структуру и свойства металла / К.В. Волков, Б.Н. Марьин, В.А. Ким [и др.] // Заготовительное производство в машиностроении. – 2010. – №9 – С. 36-39.

79. Исследование структуры и свойств стали 25Г2С после многоручьевого прокатки / К.В. Волков, Б.Н. Марьин, В.А. Ким [и др.] // Заготовительное производство в машиностроении. – 2010. – №12 – С. 45-48.

80. Формирование структурно-фазовых состояний арматуры при слитинг-процессе и последующем термоупрочнении / К. В. Волков, В. Я. Чино-

калов, С. В. Коновалов, [и др.] // Актуальные проблемы прочности : материалы 53 междунар. науч. конф. В 2 частях (Витебск, 02-05 октября 2012г.) - С. 141-142.

81. Особенности формирования структуры металла в процессе прокатки-разделения / С.М. Жучков, И.В. Шувякова, Л.В. Кулаков [и др.]// Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – №6. – С. 44-48

82. Повышение эффективности стана 370 ОАО «ММК»: совершенствование слиттинг-процесса / С.А. Левандовский, А.Б. Моллер, Д.И. Кинзин [и др.] // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2016. – Т.1. – С. 52-56.

83. Совершенствование технологии прокатки периодических профилей слиттинг-процессом на стане 370 ОАО «ММК» / С.Ю. Саранча, Г.К. Рожков, С.А. Левандовский [и др.] // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2016. – №22. – С. 116-120.

84. Барановский, Д. С. Конструктивные решения контроля ширины полосы для горячей прокатки по «слиттинг-процессу» / Д. С. Барановский // Беларусь в современном мире : Материалы XIV Междунар. науч. Конф. студ., магистр., аспирант. и мол. уч-ых, (Гомель, 13-14 мая 2021г) – С. 250-253.

85. Целиков, А.И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – Москва: Металлургия. - 1980. – 319 с.

86. Кальменев, А. А. Резервные силы трения / А. А. Кальменев, Н. Д. Лукашкин // Металлы. – 2001. – №2. С. 38 – 40.

87. Выдрин, В. Н. Динамика прокатных станов / В. Н. Выдрин. – Свердловск: Металлургиздат. - 1960. – 254 с.

88. Жучков, С. М. Использование резерва втягивающих сил трения в процессе непрерывной сортовой прокатки / С. М. Жучков // Литье и металлургия. – 2002. – №4. – С. 166 – 174.

89. Жучков, С.М. Развитие процессов с использованием резерва втягивающих сил трения / С.М. Жучков // Сталь. – 2005. – №9. – С. 39 – 43.

90. Сидельников, С. Б. Моделирование совмещенного процесса непрерывного литья и прокатки – прессования цветных металлов и сплавов / С. Б. Сидельников, А. А. Катарева, Н. Н. Довженко // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2004. – №5. – С. 34 – 38.

91. Grzyb R. Analisa sily wyciskania i naciskv na matryce walcowania przez matryce / R. Grzyb, J. Jonca, S. Kajzer // Zesz nauk AGH. – 1986. – №9. – Р. 39 – 44.

92. Фастыковский, А.Р. Изучение влияния переднего подпора на протяженность зон скольжения и прилипания в очаге деформации при прокатке / А.Р. Фастыковский, В.Н. Перетяtko // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 2. – С. 15 – 17.

93. Фастыковский, А.Р. Оценка возможностей контактных сил трения с целью интенсификации процесса прокатки на установившейся стадии / А.Р. Фастыковский, Д.А. Фастыковский // Производство проката. – 2013. – №7. – С. 9 – 12.

94. Фастыковский, А.Р. Перспективы использования резерва сил трения на контактной поверхности в очаге деформации при прокатке для повышения эффективности процесса / А.Р. Фастыковский, В.И. Базайкин, В.В. Евстифеев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2019. – № 10. – С. 810 – 815.

95. Фастыковский, А.Р. Оценка величины резервных сил трения очага деформации / А.Р. Фастыковский, В.Н. Перетяtko // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 8. – С. 42 – 44.

96. Фастыковский, А.Р. Изучение закономерностей изменения величины резервных сил трения очага деформации при прокатке / А.Р. Фастыковский, В.Н. Перетяtko // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 12. – С. 5 – 8.

97. Фастыковский, А.Р. Изучение закономерностей изменения величины резервных сил трения очага деформации при прокатке / А.Р. Фастыков-

ский, В.Н. Перетяшко // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – №12. – С. 5 – 8.

98. Фастыковский, А.Р. Увеличение эффективности прокатного оборудования за счет использования резервных сил трения очага деформации / А.Р. Фастыковский // Известия вузов. Машиностроение. – 2003. – №6. – С.59 – 63.

99. Фастыковский, А.Р. Методика расчета эффективности процессов, использующих резервные силы трения / А.Р. Фастыковский, В.Н. Перетяшко // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – №10. – С. 12 – 14.

100. Маншилин, А.Г. Оптимизация формы и размеров специальных калибров при многоручьевой прокатке – разделении / А.Г. Маншилин // Производство проката. – 2002. – № 2. – С. 17 – 21.

101. Писаренко, Ф.А. Прокатка сортовых профилей в сдвоенном виде / Ф.А. Писаренко, В.П. Следнев, А.В. Яковченко // Сталь. – 1981. – № 5. – С. 45 – 50.

102. Аленицин А.Г. Краткий физико-математический справочник [Текст] / А.Г. Аленицин, Е.И. Бутиков, А.С. Кондратьев. – Санкт – Петербург. Специальная литература, – 1998. – 436 с.

103. Жучков, С. М. Продольная устойчивость раската при прокатке балочных профилей с использованием неприводных универсальных клеток [Текст] / С. М. Жучков, А. П. Лохматов, Л. В. Кулаков // Известия вузов. Черная металлургия. –1995. – №2. – С. 31 – 33.

104. Атанин, В. Г. Сопротивление материалов. – Москва : Изд-во Юрайт, 2023. – 438 с.

105. Горшков, А.Г. Сопротивление материалов /А.Г. Горшков, В.Н. Трошин, В.И. Шалашилин . – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.

106. Фастыковский, А.Р. Оценка возможностей калибров, формирующих сочлененные профили, для реализации технологии прокатки – разделения/ А.Р. Фастыковский, В.А. Вахроломеев, А.Г. Никитин // Известия вузов. Черная металлургия. – №4. – 2022. – с. 294 – 296.

107. Вахроломеев, В. А. Производство сортовых профилей по технологии прокатки-разделения / В. А. Вахроломеев, А. Р. Фастыковский // Наука и молодежь : проблемы, поиски, решения : труды всероссийской науч. конф. студ., аспирант. и молодых уч-ых (16-17 мая 2023 г.). Выпуск 27 часть 1 - с 210 – 213.
108. Фастыковский, А.Р. Определение продольной устойчивости полозы в системе прокатной клетки – неприводное делительное устройство / А.Р. Фастыковский, В.А. Вахроломеев, А.Г. Никитин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2024. – №3. – С. 366 – 368.
109. Шевакин, Ю. Ф. Технологические измерения и приборы в прокатном производстве / Ю. Ф. Шевакин, А. М. Рытиков, Н. И. Касаткин. - Москва: Металлургия - 1973. – 367 с.
110. Чиченев, Н.А. Методы исследования процессов обработки металлов давлением / Н. А. Чиченев, А. Б. Кудрин, П. И. Полухин. – Москва : Металлургия, 1977. – 311 с.
111. Следнев, В. П. Спаренная прокатка сортовых профилей / В. П. Следнев – Москва: Металлургия - 1988. – 167 с.
112. Жучков, С.М. Особенности конструкции устройства продольного разделения раската для трехниточной прокатки – разделения / С.М. Жучков // Металлург. – 2000. – №11. – С. 42 – 43.
113. Жучков, С.М. Направление развития технологии прокатки – разделения на стане 320/150 / С.М. Жучков // Сталь. – 2001. – №10. – С. 33 – 35.
114. Иванова, В.М. Математическая статистика / В.М. Иванова. – Москва: Высшая школа, 1991. – 367 с.
115. Королев, Ю. Г. Метод наименьших квадратов в социально – экономических исследованиях / Ю. Г. Королев. – Москва: Статистика. - 1980. – 111 с.

116. Чижигов, Ю. М. Теория подобия и моделирование процессов обработки металлов давлением [Текст] / Ю. М. Чижигов. – Москва: Металлургия, 1970. – 295 с.
117. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. – Москва: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.
118. А.с. 1066679 СССР, МКИ<sup>3</sup> В21В1/00. Способ прокатки заготовок преимущественно на реверсивном стане / Ю.М. Чуманов, А.Н. Шичков, В.Ф. Губайдулин, [и др.]; опубл. 15.01.84. Бюл. №2.
119. А.с. 718186 СССР, МКИ<sup>2</sup> В21В1/02. Способ прокатки заготовок / Г.М. Шульгин, Ю.М. Чуманов, В.Ф. Губайдуллин [и др.]; опубл. 28.02.80. Бюл. №8.
120. А.с. 1274321 СССР, МКИ<sup>4</sup> В21В1/02. Способ прокатки заготовок / Ю.М. Чуманов, В.Ф. Губайдуллин, Г.М. Шульгин [и др.]; опубл. 30.03.85. Бюл. №12.
121. Целиков, А.И. Теория прокатки / А.И. Целиков, А.И. Гришков. – Москва: Металлургия, 1970. – 358 С.
122. Грудев, А.П. Теория прокатки / А.П. Грудев. – Москва: Металлургия, 1988. – 240 С.
123. Фастыковский, А. Р. Определение резерва сил трения калибров, формирующих сочлененный профиль для последующего продольного разделения / А. Р. Фастыковский, В. А. Вахроломеев // Металлургия: технологии, инновации, качество : XXII междунар. науч. – практич. конф. (10-11 ноября 2021 г.). – Новокузнецк : СибГИУ, 2021. - часть 1 - С. 286.
124. Повышение эффективности производства сортового проката / В. А. Вахроломеев, М. И. Глухов, Х. Н. Зохидов, [и др.] // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : Труды всероссийской науч. конф. студ., аспирантов и молодых ученых (17-18 мая 2022 г.) Выпуск 26 - С. 325 – 326.
125. Фастыковский, А. Р. Повышение эффективности производства арматурных профилей / А. Р. Фастыковский, В. А. Вахроломеев // Современные

тенденции развития науки и мирового общества в эпоху цифровизации : XII Междунар науч.-практич. конф. (Москва, 28 февраля 2023 г.).

126. Фастыковский, А.Р. Резервы снижения энергопотребления при прокатке сортовых профилей на современных прокатных станах / А.Р. Фастыковский, М.И. Глухов, В.А. Вахроломеев // Известия вузов. Черная металлургия. – №3. – 2023. – с. 290 – 292.

127. Фастыковский, А.Р. Энергосбережение при производстве сортовых профилей прокаткой / А.Р. Фастыковский, Т.Н. Осколкова, В.А. Вахроломеев, и др. – В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXIII Международной научно-практической конференции. В 2-х ч. – Новокузнецк 2022. С. 278-283.

128. А.с. 718186 СССР, МКИ<sup>2</sup> В21В1/02. Способ прокатки заготовок / Г.М. Шульгин, Ю.М. Чуманов, В.Ф. Губайдуллин [и др.]; опубл. 28.02.80. Бюл. №8.

129. А.с. СССР, МКИ<sup>4</sup> В21В1/02. Способ прокатки заготовок / Ю.М. Чуманов, В.Ф. Губайдуллин, Г.М. Шульгин [и др.]; опубл. 30.03.85. Бюл. №12.

130. Фастыковский, А.Р. Эффективная технология прокатки-разделения для производства арматурных профилей / А.Р. Фастыковский, В.А. Вахроломеев // XIII Международная научно-практическая конференция «Актуальные научные исследования» Пенза 25 июля 2023 г

# Приложение А

Согласовано  
*[Handwritten signature]*



УТВЕРЖДАЮ

Начальник Технического  
управления АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

*[Handwritten signature]*  
Л.Е. Васильев

марта 2024 год

## АКТ

о промышленном использовании  
результатов диссертационной работы Вахроломеева В.А.  
по изучению процесса прокатки – разделения арматурных профилей в  
условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Настоящим актом удостоверяется факт использования разработанных Вахроломеевым В.А. математических моделей для оценки условий осуществимости процесса прокатки – разделения арматурных профилей.

С использованием предлагаемых математических моделей и алгоритмов возможно разработать рекомендации по выбору рациональных условий осуществления процесса прокатки – разделения арматурных профилей №8, №10, №12 в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Установлено, что толщина соединительной перемычки в сдвоенном сочлененном профиле не должна превышать 2 мм, коэффициент вытяжки в клети, формирующей окончательный сочлененный профиль не менее 1,02, расстояние от клети до делительного устройства не более 220 мм.

Определена возможность и условия разделения строенного сочлененного профиля, согласно которым толщина соединительной перемычки не должна превышать 1 мм, коэффициент вытяжки в клети, формирующей строенный профиль не менее 1,02, расстояние от клети до делительного устройства не более 210 мм. Рекомендации позволят обосновано выбирать рациональные режимы формоизменения сочлененных профилей и последующее продольное разделение, а также компоновку делительного устройства.

Разработанные рекомендации позволят снизить брак и простои, при производстве арматурных профилей слитинг-процессом, что принесет экономический эффект до 9,1 млн. рублей. (по расчету от фактических показателей 2022 года).

Зам. Начальника СПЦ  
- начальник стана 250-1

Аспирант ФГБОУ ВО СибГИУ

*[Handwritten signature]*  
*[Handwritten signature]*

М.Н. Балахнин

В.А. Вахроломеев

## Экономические расчеты

к акту о промышленном использовании результатов диссертационной работы Вахроломеева В.А. по изучению процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного устройства

Использование разработанных математических моделей процесса прокатки – разделения позволяет обосновано выбирать режимы формоизменения сочлененных профилей и условия продольного разделения неприводным делительным устройством, а также компоновку делительного устройства относительно клетки, формирующей сочлененный профиль. Правильная оценка условий ведения процесса прокатки – разделения в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволяет снизить материальные затраты связанные с браком в недокатах и не запланированные простои оборудования.

Продукция, получаемая прокаткой – разделением (слиттинг-процессом) на стане 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» составляет 80-85%, объем брака в недокатах в среднем 0,8 – 0,7 % от уровня производства. Обоснованный выбор режимов формирования сочлененного профиля и последующего разделения снизит уровень брака в недокатах на 0,1% и за счет этого годовой экономический эффект составит:

$$\mathcal{E}_n = (C_p - C_l) * O_b,$$

где  $C_p$  – цена реализации одной тонны готовой продукции;  $C_l$  – цена тонны лома;  $O_b$  – величина снижения объема брака в недокатах.

$$\mathcal{E}_n = (43000 - 24000) * 370 = 7 \text{ млн. руб.}$$

Снижение времени не предвиденных простоев составит 14 часов. Экономический эффект от снижения простоев основного оборудования составит:

$$\mathcal{E}_n = 14 * 160000 = 2,1 \text{ млн. руб.}$$

Суммарный эффект составит:

$$\mathcal{E}_\Sigma = 7 + 2,1 = 9,1 \text{ млн. руб.}$$

Зам. Начальника СПЦ  
- начальник стана 250-1



М.Н. Балахнин

# Приложение Б

Министерство науки и высшего образования РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»

УТВЕРЖДАЮ:  
Проректор по образовательной  
деятельности  
к.т.н., доцент  
О.Т. Приходько  
«18» марта 2025 г.



## Справка о внедрении результатов диссертации Вахроломеева Владимира Анатольевича в учебный процесс

Основные результаты диссертационной работы Вахроломеева Владимира Анатольевича «Совершенствование технологических режимов прокатки – разделения арматурных профилей с целью снижения материальных затрат» используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению подготовки 22.03.02 «Металлургия» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Технология прокатного производства», «Основы технологических процессов обработки металлов давлением».

Заведующий кафедрой  
ОМДиМ ЕВРАЗ ЗСМК,  
д.т.н., доцент



Е.В. Арышенский

Начальник Управления организации и  
сопровождения образовательной  
деятельности,  
к.э.н., доцент



Т.А. Волкова