

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

Автореферат на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, доцент  
Фастыковский Андрей Ростиславович

Новокузнецк, 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель: **Фастыковский Андрей Ростиславович**  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Тулупов Олег Николаевич**, доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной работе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.Н. Носова», г. Магнитогорск

**Шварц Данил Леонидович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Защита состоится 3 декабря 2025 г. 13-00 в ауд. 3П на заседании диссертационного совета 24.2.401.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу 654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, СибГИУ.  
факс: (3843)46-57-92; e-mail: [ds21225201@sibsiu.ru](mailto:ds21225201@sibsiu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» [www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.401.01,  
д.т.н., доцент



Уманский Александр  
Александрович

## **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 Н.Н., Волков В.К. и др. Накоплен большой экспериментальный 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, поиск 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. Предложенная зависимость учитывает геометрические параметры и форму сочлененного профиля, продольное усилие необходимое для разделения.

### **Практическая значимость работы**

- предложен алгоритм для определения области осуществимости процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного инстру-

мента и поиска рациональных режимов формоизменения и разделения сочлененных полос при реализации технологии на действующем производстве.

- предложены зависимости, позволяющая 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 мелкосортного стана 250-1 АО ЕВРАЗ ЗСМК, позволившие снизить материальные затраты (ожидаемый экономический эффект, подтвержденный соответствующим актом 9,1 млн. рублей в год).

- результаты исследований используются в учебном процессе при чтении лекций, в курсовом и дипломном проектировании при подготовке бакалавров по направлению подготовки 22.03.02 Metallургия.

### **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, 2023г.г; 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, показана научная новизна работы, практическая значимость, описана методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации, публикациях и структуре диссертации.

**В первой главе** отмечено, что в настоящее время значительное внимание ученых и практиков уделяется развитию теории и технологии процесса прокатки – разделения применительно к получению арматурных профилей. Большой вклад в решение этой важной задачи внесли отечественные и зарубежные ученые Клименко В.М., Губайдулин В.Ф., Шульгин Г.М., Жучков С.М., Matsuo G., Следнев В.П., Перунов Г.П., Wisselink Н.Н., Волков В.К. и др.

Дан обзор имеющихся в настоящее время вариантов реализации технологии прокатки – разделения, рассмотрены известные способы продольного разделения сочлененных профилей. Проведен анализ известных в литературе математических зависимостей, описывающих процесс прокатки – разделения и

экспериментального материала по влиянию различных факторов на изучаемый процесс.

Выявлена тенденция преимущественного использования на действующих и вновь строящихся прокатных станах варианта технологии прокатки – разделения, предусматривающая последовательное выполнение операций: формирование сочлененного профиля и разделение в неприводном делительном устройстве. Несмотря на практический интерес к технологии прокатки – разделения, большое число исследований и публикаций, остаются нерешенными вопросы теоретического описания этапов формирования сочлененных профилей и последующего разделения в неприводном делительном устройстве. Отсутствие надежного математического аппарата, проверенного экспериментально затрудняет процесс проектирования технологии прокатки - разделения на действующих и вновь строящихся прокатных станах, а также обоснованный выбор рациональных режимов ведения рассматриваемого процесса.

Проведенный анализ литературных источников позволил сформулировать цель и задачи исследования.

**Во второй главе** приведено теоретическое обоснование процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного инструмента. Условием осуществимости рассматриваемого процесса является выполнение неравенства:

$$Q_1 > Q_2, \quad (1)$$

где  $Q_1$  – продольная сила, обеспеченная резервом сил трения клетки, формирующей сочлененный профиль при установившейся стадии процесса прокатки, кН;  $Q_2$  – продольная сила, необходимая для разделения сочлененного профиля передавливанием или разрывом, кН.

Для определения продольной силы  $Q_1$  в калибрах различной формы, формирующих сочлененный профиль, необходимо было оценить возможности резерва сил трения при различных режимах формоизменения. При решении данной задачи рассмотрены уравнения равновесия сил в очаге деформации при прокатке с подпором, величина которого полностью уравнивается резер-

вом сил трения. После решения уравнений равновесия сил в очаге деформации получены зависимости, позволяющие оценить величину показателя резерва сил трения ( $\sigma_1/\sigma_s$ ) от формы калибра и условий формоизменения вида:

Формирование сочлененного профиля выступами на валках.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{2l_d h_2 n_{\text{пер}}}{S \left( 2\mu_y - \alpha \sin \frac{\beta}{2} \right) \cos \frac{\beta}{2}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_1$  – напряжение подпора, уравнивающее резерв сил трения, МПа;  $\sigma_s$  – сопротивление деформации, МПа;  $l_d$  – длина дуги захвата, мм;  $h_2$  – высота гребня, мм;  $n_{\text{пер}}$  – число перемычек;  $\beta$  – угол между сторонами гребня, град;  $\alpha$  – угол захвата, рад;  $S$  – площадь поперечного сечения сочлененного профиля, мм<sup>2</sup>;  $\mu_y$  – коэффициент трения на установившейся стадии процесса прокатки.

Формирование сочлененной полосы в прямоугольных калибрах.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{l_d n}{S} \left[ (b_k - b_2)(\mu_y - 0,5) - \alpha h_2 \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + \frac{2h_2 \mu_y}{\cos \frac{\beta}{2}} \left( 1 + \frac{2}{n} \right) \right], \quad (3)$$

где  $b_2$  – ширина гребня (выступа), мм;  $b_k$  – ширина полосы, мм;  $n$  – число сочлененных профилей.

Формирование сочлененной полосы в квадратных калибрах.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{h_p n l_d}{S} (2,8\mu_y - \alpha), \quad (4)$$

где  $h_p$  – высота ручья, мм.

Формирование сочлененной полосы в круглых калибрах.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{l_d n}{2r_l} (2\mu_y - \alpha), \quad (5)$$

где  $r_l$  – радиус круглого калибра, мм.

Показатель резерва сил трения - величина относительная, позволяющая оценить степень влияния различных факторов на запас резерва сил трения на стадии установившегося процесса формирования сочлененных профилей. Используя показатель резерва сил трения, можно определить величину макси-

мального напряжения подпора ( $\sigma_1$ ) и максимальное значение продольной силы  $Q_1$ , обеспеченной резервом сил трения:

$$Q_1 = \sigma_1 S. \quad (6)$$

При проверке условия (1) необходимо знать величину продольной силы ( $Q_2$ ), необходимой при разделении сочлененных профилей передавливанием или разрывом перемычки. Предложены теоретические зависимости для оценки величины продольной силы ( $Q_2$ ) при разделении перемычки передавливанием и разрывом вида:

#### Передавливание

$$Q_{неп} = h_s (h_s + h_{неп}) n_{неп} \sigma_s \operatorname{tg} \frac{\omega_p}{2} = Q_2; \quad (7)$$

$$h_s = \frac{h_{неп} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{2 \left( \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} - \operatorname{tg} \frac{\omega_p}{2} \right)}, \quad (8)$$

где  $h_{неп}$  – толщина перемычки, мм;  $h_s$  – высота перемычки, мм;  $\omega_p$  – угол при вершине делительного ролика, град.

#### Разрыв

$$Q_{разр} = 2(P_{разр} + P_{изг}) \operatorname{tg} \frac{\gamma_\kappa}{2} = Q_2; \quad (9)$$

$$P_{разр} = n_{неп} F_{разр} \sigma_s; \quad F_{разр} = \frac{h_{неп} l_{разр}}{2}; \quad l_{разр} = \frac{h_{неп}}{2 \operatorname{tg} \frac{\gamma_\kappa}{2}}; \quad (10)$$

$$P_{изг} = \frac{W_{нл.изг} \sigma_s}{l_{изг}}; \quad (11)$$

$$l_{изг} = \sqrt{K_p (D_p - K_p)} - \frac{b_z}{2 \cos \frac{\gamma_\kappa}{2}}; \quad \gamma_\kappa = 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{\operatorname{tg} \frac{\omega_p}{2}}{\sqrt{\frac{D_p}{K_p} - 1}} \right); \quad K_p = \frac{b_z}{2 \operatorname{tg} \frac{\omega_p}{2}}, \quad (12)$$

где  $P_{разр}$  – сила необходимая при разрыве перемычки, кН;  $P_{изг}$  – сила изгиба разделенных профилей, кН;  $F_{разр}$  – площадь разрыва, мм<sup>2</sup>;  $l_{разр}$  – длина участка, где происходит разрыв, мм;  $D_p$  – диаметр делительного ролика, мм;  $K_p$  – глубина внедрения делительного ролика в сочлененный профиль, мм;  $W_{нл.изг}$  – мо-

мент сопротивления при пластическом изгибе, мм<sup>3</sup>;  $l_{изг}$  – плечо приложения изгибающей силы, мм.

Особенность процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного устройства в том, что формирование сочлененного профиля и его продольное разделение осуществляются в двух разных устройствах, расположенных на расстоянии друг от друга. Неправильный выбор расстояния при выполнении условия (1) может привести к потере продольной устойчивости и невозможности осуществления процесса прокатки – разделения. Для определения допустимого расстояния, обеспечивающего продольную устойчивость сочлененной полосы при разделении, использована известная формула Эйлера, преобразованная применительно к сочлененным профилям различной формы:

Сочлененный профиль, сформированный в прямоугольных калибрах.

$$l_{доп} = \frac{0,9h_k \sqrt{Eb_k h_k}}{k \sqrt{Q_2}}, \quad (15)$$

где  $h_k$  – высота калибра, мм;  $E$  – модуль упругости первого рода, МПа;  $k$  – коэффициент приведения длины;  $l_{доп}$  – допустимое расстояние, обеспечивающее продольную устойчивость, мм.

Сочлененный профиль, сформированный в квадратных калибрах.

$$l_{доп} = \frac{0,46h_k^2 \sqrt{E}}{k \sqrt{Q_2}}. \quad (16)$$

Сочлененный профиль, сформированный в круглых калибрах.

$$l_{доп} = \frac{3,6r_l^2 \sqrt{E}}{k \sqrt{Q_2}}. \quad (17)$$

Полученные теоретические зависимости, позволяют с учетом многообразия факторов, влияющих на процесс прокатки – разделения с использованием неприводного делительного устройства, оценить область осуществимости изучаемого процесса и выбрать рациональные условия его реализации, снижающие материальные затраты.

В третьей главе обосновывается выбор материала для моделирования в лабораторных условиях процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного инструмента способами разрыв и передавливание. Рассмотрены созданные лабораторные установки, предназначенные для изучения величины продольной силы, обеспеченной резервом сил трения, при формировании сочлененных профилей различной формы, и описана методика выполнения экспериментов. Приведены установка и методика для исследования влияния толщины перемычки сочлененных профилей, формы поперечного сечения профиля, геометрических параметров делительных роликов и способа продольного разделения на величину необходимого продольного усилия разделения в неприводном устройстве. Подробно приведена разработанная методика и лабораторная установка для изучения условий продольной устойчивости сочлененной полосы в промежутке между прокатной клетью и неприводным делительным устройством при разделении.

Для проверки достоверности полученных математических зависимостей и изучения факторов, влияющих на величину максимальной продольной силы, обеспеченной резервом сил трения, были проведены лабораторные эксперименты, результаты которых приведены на рисунках 1, 2.

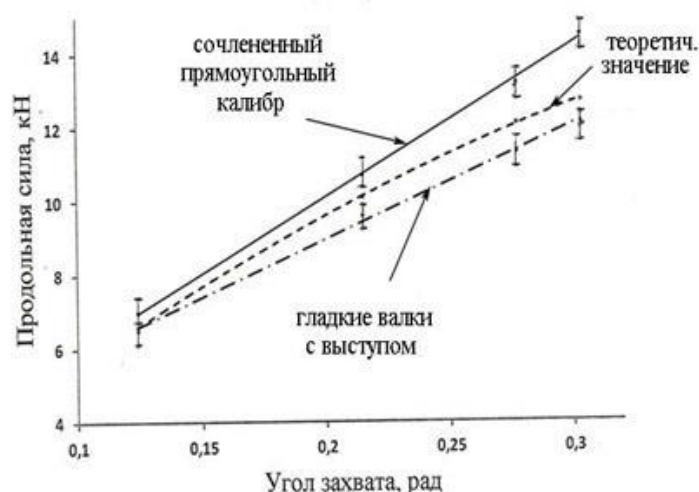


Рисунок 1 – График зависимости максимальной продольной силы, обеспеченной резервом сил трения клетки, формирующей сочлененный профиль ( $Q_1$ ) от угла захвата и формы калибра



Рисунок 2 – Влияние формы сочлененного профиля и угла захвата на величину продольной силы, обеспеченной прокатной клетью ( $Q_1$ )

Результаты экспериментальных и численных исследований факторов, влияющих на величину продольной силы при разделении передавливанием и разрывом ( $Q_2$ ), приведены на рисунках 3,4. Представленные результаты подтверждают достоверность полученных теоретических зависимостей.

Экспериментально изучены условия продольной устойчивости сочлененной полосы при разделении в промежутке между клетью и неприводным делительным устройством. Уточнено значение коэффициента приведения длины для рассматриваемого случая, величину которого рекомендовано в расчетах принимать равной 0,7.

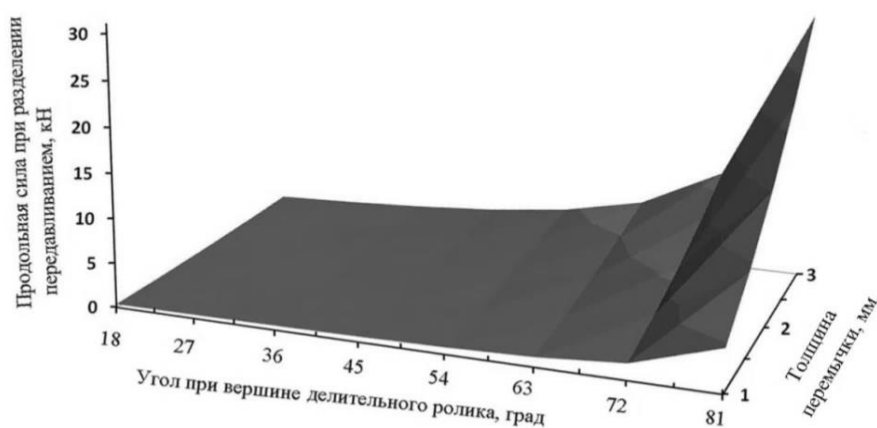


Рисунок 3 – График влияния толщины перемычки и угла при вершине делительного ролика на продольную силу при разделении передавливанием



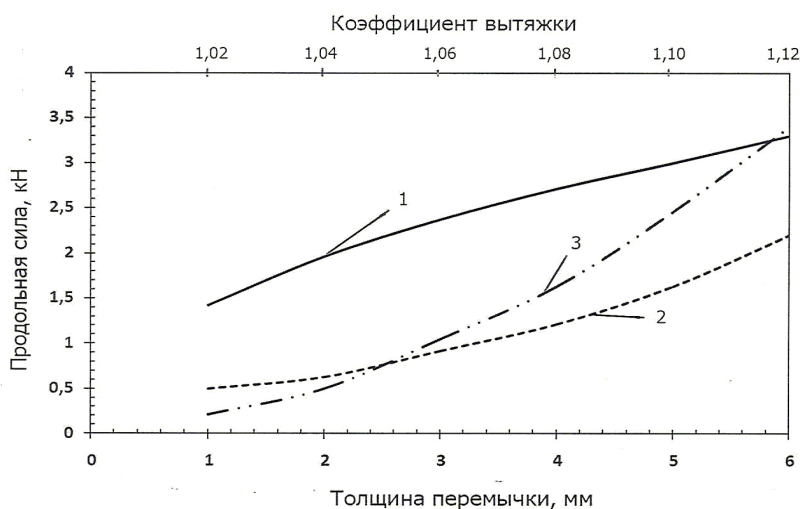
Рисунок 4 – График влияния толщины перемычки и формы сочлененного профиля на продольную силу при разделении разрывом.

В результате проведенных исследований проверена достоверность предлагаемых теоретических зависимостей, получены новые экспериментальные данные по влиянию основных технологических факторов на условия реализации процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного устройства.

Для удобства практического использования теоретический материал обобщен в алгоритм поиска рациональных режимов осуществления изучаемого процесса прокатки – разделения, обеспечивающих снижение материальных затрат на производство арматурных профилей.

**В четвертой главе** показана целесообразность использования полученного теоретического и экспериментального материала для совершенствования прокатки арматурных профилей в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО ЕВРАЗ ЗСМК. С использованием разработанного алгоритма определена область осуществимости процесса прокатки – разделения с использованием неприводного делительного устройства при производстве арматурных профилей №8, №10, №12 (рисунок 5).

Для исследуемых арматурных профилей определены допустимые расстояния от очага деформации клетки, формирующей сочлененный профиль, до неприводного делительного инструмента, обеспечивающие продольную устойчивость сочлененного профиля при разделении (рисунок 6).



1- продольная сила  $Q_1$ ; 2 – продольная сила необходимая при разделении разрывом; 3 – продольная сила необходимая при разделении раздавливанием

Рисунок 5 – Область осуществимости процесса прокатки – разделения для арматуры №8 в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Рассмотрена перспектива организации процесса прокатки – разделения строенных профилей. Определены возможные нагрузки на оборудование и оценена продольная устойчивость строенного профиля при разделении применительно к условиям непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

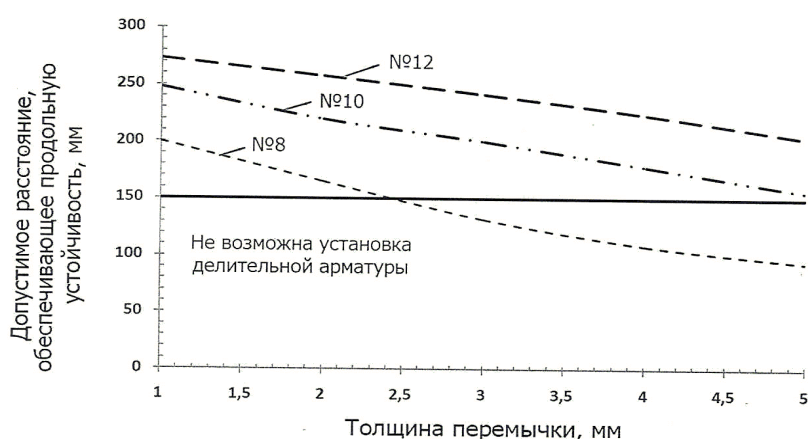


Рисунок 6 – Условия продольной устойчивости в промежутке между 15 клетью и неприводным делительным устройством при реализации прокатки – разделения разрывом на непрерывном мелкосортном стане 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» арматурных профилей разных номеров

Проведенные исследования процесса прокатки – разделения позволили сформулировать рекомендации по совершенствованию технологии получения арматурных профилей №8, №10, №12 в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК», обеспечивающие снижение материальных затрат. Ожидаемый экономический эффект от разработанных мероприятий и рекомендаций, подтвержденный соответствующим актом, составит 9,1 млн. рублей в год. 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.

## **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 клеток 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 рациональное 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 клети 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 Metallurgy.

## Основные публикации по теме диссертации

*Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. 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. – 2022. – №4. – С. 294 – 296.

2. 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. – 2023. – №3. – С. 290 – 292.

3. Фастыковский, А.Р. Определение продольной устойчивости полосы в системе прокатная клеть – неприводное делительное устройство А.Р. Фастыковский, В.А. Вахроломеев, А.Г. Никитин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2024. – №3. – С. 366 – 368.

*Научные статьи, опубликованные в периодических изданиях и трудах научно-практических конференциях:*

1. Фастыковский, А.Р. Определение резерва сил трения калибров, формирующих сочлененный профиль для последующего продольного разделения / А.Р. Фастыковский, В.А. Вахроломеев. – В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXII Международная научно – практическая конференция. В 2-х ч. – Новокузнецк, 2021. С. 286 – 288.

2. Вахроломеев, В.А. Повышение эффективности производства сортового проката / В.А. Вахроломеев, М.И. Глухов, Х.Н. Зохидов [и др.]. – В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2022. С. 325 – 326.

3. 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 Меж-

дународной научно-практической конференции. В 2-х ч. – Новокузнецк 2022. С. 278 – 283.

4. Фастыковский, А.Р. Повышение эффективности производства арматурных профилей / А.Р. Фастыковский, В.А. Вахроломеев. – В кн.: Современные тенденции развития науки и мирового общества в эпоху цифровизации. Труды XII Международная научно-практическая конференция. – Москва, 2023. С. 82 – 86

5. Вахроломеев, В.А. Производство сортовых профилей по технологии прокатки-разделения / В.А., Вахроломеев, А.Р. Фастыковский. – В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х ч. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2023. С. 210 – 213.

6. Фастыковский, А.Р. Эффективная технология прокатки-разделения для производства арматурных профилей / А.Р. Фастыковский, В.А. Вахроломеев. – В кн.: Актуальные научные исследования. Труды XIII Международная научно-практическая конференция. – Пенза, 2023. С. 135 – 137.

Подписано в печать 2025. Формат 60x84 1/16

Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в Издательском центре СибГИУ

654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н,  
ул. Кирова, зд. 42