

На правах рукописи

НУХОВ Данис Шамильевич

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
НОВЫХ СПОСОБОВ КУЗНЕЧНОЙ ПРОТЯЖКИ И ПРОКАТКИ  
ВЫСОКИХ ЗАГОТОВОК В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ  
ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

05.16.05 – Обработка металлов давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор

**Богатов Александр Александрович**

**Официальные оппоненты:** **Лехов Олег Степанович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», профессор кафедры «Автомобили и подъемно-транспортные машины»;

**Песин Александр Моисеевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор кафедры «Обработка металлов давлением»

**Ведущая организация:** Открытое акционерное общество «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург

Защита состоится «21» декабря 2015 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Мальцева Людмила Алексеевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В 2009 году на предприятии ОАО «ММК» был запущен стан 5000. Стан 5000 ОАО «ММК» уникален как по российским, так и по международным масштабам. Значимость стана для отечественной металлургии и обеспечения потребителей импортозамещающей продукцией очень велика. Особенностью стана 5000 ОАО «ММК» является его уникальность с точки зрения качественных характеристик выпускаемой продукции, которые достигаются за счет применения технологии контролируемой прокатки. Стан 5000 производит толстолистовой стальной прокат, который используется в нефтегазовой отрасли, судостроении, при строительстве мостов, в машиностроении, но большая часть продукции предназначена для производства труб для магистральных нефте- и газопроводов.

В связи с активным освоением нефте- и газодобычи в суровых климатических и геологических условиях повышаются требования к свойствам, качеству и надежности эксплуатации нефтегазопроводных труб большого диаметра. Для современной технологии толстолистовой прокатки характерными дефектами являются: разнородность по высоте проката, строчечная структура ликватов, неметаллических включений и т.п. Эти дефекты снижают прочностные характеристики металла проката, особенно в поперечном направлении листа, провоцируют разрушение магистральных нефте- и газопроводов. При модернизации технологического процесса необходимо обеспечить равномерное распределение накопленной деформации в объеме заготовки при прокатке непрерывно-литого сляба. Перспективным является развитие идеи разработки новых схем деформации заготовки с размерами приближенными к размерам готовой продукции путем применения интенсивной знакопеременной деформации.

Исходя из изложенного, актуальной задачей является повышение степени и однородности деформации в объеме литой заготовки, формирование однородной структуры толстолистового проката за счет обеспечения интенсивности знакопеременной деформации непрерывно-литого сляба в

условиях действия сжимающих напряжений. Решение задачи будет способствовать повышению эксплуатационной надежности листа.

Изложенное выше позволило сформулировать **цель диссертационного исследования**: разработка и исследование высокоэффективных способов прокатки иковки заготовок, основанных на идее интенсификации знакопеременной деформации в объеме литого слитка, а также разработки на их основе новой технологической схемы проката, обеспечивающей экономию материало- и энергозатрат на производство продукции.

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

- на основе литературного обзора проанализировать технологию производства толстолистого проката на стане 5000 ОАО «ММК», определить пути снижения неравномерности деформации при черновой прокатке и изучить способы ОМД, способствующие получению металлоизделий с однородной ультрамелкозернистой структурой;

- разработать способ протяжки слитков с сохранением формы и размеров заготовки путем применения интенсивной знакопеременной деформацией. Разработать техническое решение по конструкции нового инструмента деформации и технологииковки литых слитков, обеспечивающие знакопеременную деформацию заготовки при протяжке;

- предложить и исследовать способы толстолистной прокатки, направленные на обеспечение интенсивной знакопеременной деформации в очаге деформации при минимальных изменениях размеров заготовки;

- создать методику расчета рациональной калибровки валков из условия достижения максимальной амплитуды и однородности знакопеременной деформации по высоте проката при минимальном обжатии за проход;

- разработать новую схему прокатки толстого листа и доказать эффективность предлагаемого технологического режима прокатки для увеличения степени деформации за проход и повышение однородности деформационной проработки литого сляба, а также снижения энерго- и

трудозатрат при производстве листа на стане 5000 ОАО «ММК».

Работа проводилась в соответствии со следующими государственными планами и программами: «Разработка научных основ физики и механики обработки металлов давлением с целью создания энерго- и ресурсосберегающих инновационных технологий производства металлургической продукции ответственного назначения» (государственное задание в сфере научной деятельности №11.1369.2014/К от 18.07.2014, № гос. регистрации 114122470051); «Создание новых технологических процессов, машин и систем автоматизированного проектирования в области обработки металлов давлением на основе современных достижений механики, прикладной математики и информатики» (программа Минвуза РФ, 2011–2013 г.); «Инновационные технологические процессы обработки металлов давлением» (Президентская программа повышения квалификации инженерных кадров, № гос. рег. 55–2013–3–ЭФ, приказ по Минобрнауки России № 328 от 30.04.2013).

**Методология и методы исследования:** методологической основой исследования послужили работы таких ученых, как Л.И. Ефрон, В.И. Погоржельский, В.М. Сегал, Р.З. Валиев, А.А. Богатов, В.Л. Колмогоров, В.А. Тюрин, В.К. Смирнов, И.Я. Тарновский, А.И. Целиков, А.П. Грудев, Ю.В. Коновалов и др.; в работе были применены метод тонких сечений; а также методы МКЭ-моделирования процессов прокатки и кузнечной протяжки высоких заготовок в программном комплексе Deform-3D.

**Научную новизну и теоретическую ценность** представляют следующие разработки диссертации:

- способы ковки и прокатки литых заготовок, обеспечивающие высокую степень и однородность распределения деформации в объеме высокой заготовки;
- показатель неоднородности накопленной степени деформации в объеме заготовки, в виде коэффициента вариации  $S/\bar{\varepsilon}_v$ , удобный для анализа и прогнозирования качества структуры при прокатке;

- закономерности формоизменения и изменения деформированного состояния заготовок при новом способековки в бойках с профилированной и гладкой поверхностью;

- условия появления знакопеременной деформации при прокатке заготовок в два прохода в валках с профилированным и гладким профилем бочки;

- технологические режимы прокатки и размеры профилированных валков, обеспечивающие увеличение степени и однородности распределения деформации по сечению толстолиствого проката;

- новая схема прокатки толстого листа.

**Практическую ценность** диссертации составляют следующие результаты:

- количественные характеристики неравномерности деформации по высоте проката в зависимости от режимов черновой прокатки на стане 5000;

- техническое решение по конструкции нового инструмента деформации и технологииковки литых слитков без изменения формы и размеров заготовки;

- новые способы прокатки и конструкция инструмента деформации;

- методика расчета рациональной калибровки валков из условия достижения максимальной амплитуды и однородности знакопеременной деформации по высоте проката при минимальном обжатии за проход;

- выполнен сравнительный анализ эффективности новой схемы прокатки по сравнению с существующей и выявлены основные преимущества ее практического использования на стане 5000 ОАО «ММК».

**На защиту выносятся:**

- способковки и инструмент деформации, обеспечивающие повышение степени и однородности распределения деформации в объеме заготовки, за счет интенсивной знакопеременной деформации с сохранением формы и размеров исходной заготовки;

- новые способы прокатки заготовки, теоретически доказана их эффективность для обеспечения однородной деформационной проработки литой структуры;

– методика расчета рациональной калибровки валков из условия достижения максимальной амплитуды и однородности знакопеременной деформации по высоте проката при минимальном обжатии за проход;

– научное обоснование новой схемы и режимов прокатки толстолистовой стали на стане 5000 ОАО «ММК», обеспечивающих интенсивную и однородную по высоте сляба деформационную проработку, а также снижение энерго- и трудозатрат на производство продукции.

**Достоверность** полученных в диссертации результатов подтверждается применением современных методик теоретического исследования формоизменения металла и энергосиловых параметров процессовковки и прокатки, основанных на использовании метода конечных элементов, сопоставлением полученных результатов с положениями современного физического материаловедения, механики обработки металлов давлением, а также с известными экспериментальными и теоретическими результатами, полученными ведущими учеными в металлургии.

В целом разработанные научные положения и результаты диссертации направлены на решение задачи исследования и разработки способов прокатки и кузнечной протяжки непрерывно-литых заготовок в условиях интенсивной знакопеременной деформации, а также разработки на их основе новой технологической схемы проката, обеспечивающей экономию материало- и энергозатрат на производство толстолистового стального проката.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 12-я международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2015); XVI международная научная конференция «Новые технологии и достижения в металлургии и инженерии материалов и процессов» (г. Ченстохова, Польша, 2015); Международный научно-технический конгресс «ОМД-2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии» (г. Москва, 2014); Международная научная конференция «СОМАТ 2014» (Чехия, г. Пльзень, 2014);

Восьмая международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении» (г. Екатеринбург, 2014); XXI международная научно-практическая конференция «Трубы 2014» (г. Челябинск, 2014); Международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства» (г. Магнитогорск, 2015).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 14-ти печатных трудах, в том числе в 4-х рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Одна статья вошла в международную базу Web of Science.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и изложена на 142 страницах машинописного текста, включая 61 рисунок, 15 таблиц и библиографический список из 95 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** раскрыта актуальность работы, обоснована цель, сформулированы задачи, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

**В первой главе**, на основе опубликованных результатов исследований, проанализирована технология производства толстолистого проката на стане 5000 ОАО «ММК», определены пути снижения неравномерности деформации при черновой прокатке и изучены способы обработки металлов давлением, способствующие получению металлоизделий с однородной ультрамелкозернистой структурой.

**Во второй главе** разработан и всесторонне изучен способ протяжки слитков с интенсивной знакопеременной деформацией с сохранением формы и размеров заготовки.

С целью интенсификации процесса и равномерного распределения деформации при протяжке слитков  $l$  в работе предлагается использовать

кузнечные штампы 2 [68], имеющие два участка рабочей поверхности – гладкий 3 и профильный 4 (рисунок 1): профильный участок выполнен в виде выступов 5 и углублений 6 с формой цилиндрических сегментов, чередующие друг друга и расположенные под углом  $90^\circ$  к оси протяжки, а радиусы углублений и выступов равны. Цилиндрические сегменты выступов внедряются в тело заготовки и за счет своей формы вытесняют частицы металла в углубления штампов (рисунок 2а). После чего совершают смещение заготовки на величину длины профильного участка бойков и обжатие ее на плоском участке инструмента до выравнивания поверхности заготовки, при этом происходит течение металла в обратном направлении (рисунок 2). В результате обжатия в два этапа осуществляется знакопеременная деформация.

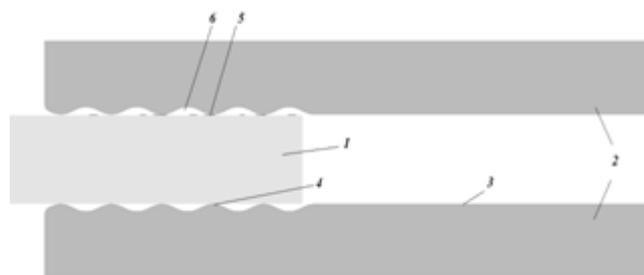


Рисунок 1 – Обжатие заготовки в штампах с комбинированной рабочей поверхностью

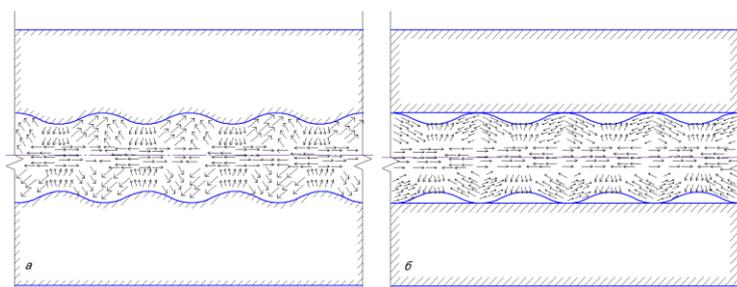


Рисунок 2 – Направление скорости частиц металла при обжатии на профильном (а) и гладком участках штампов (б)

Ставилась задача определить рациональную гравюру профильного участка штампа, которая, при минимальном обжатии заготовки, обеспечивает полное

заполнение полости углублений штампа, а также равномерное распределение степени деформации во всем объеме поковки, накопленной за два этапа протяжки. Анализ формоизменения и деформированного состояния металла, проведенный по результатам решения задач МКЭ-моделирования в программе DEFORM, позволил найти оптимальные соотношения параметров формы поверхности штампа и очага деформации, при которых на первом этапе металл полностью заполняет полости углубления штампа (коэффициент заполнения углубления штампа  $\delta = 100\%$ ) при минимальном обжатии по толщине заготовки в 10%:  $e/r = 1,75$  и  $r/h = 2/5$ , где  $r$  – радиусы цилиндрических сегментов углублений и выступов;  $e$  – расстояния между линиями центров цилиндрических поверхностей выступов и углублений;  $h$  – высота заготовки.

На основе результатов компьютерного моделирования, установлено, что для достижения однородной деформационной проработки в очаге деформации, рациональными являются относительное обжатие  $\Delta h/h = 0,1$ , а величина подачи  $l = \frac{14b}{h}$ . При кузнечной протяжке по новому способу обеспечивается знакопеременная деформация с равномерной проработкой литой структуры во всем объеме поковки при незначительном изменении размеров исходной заготовки.

Определено напряженное состояние металла поковки при обжатии в комбинированных штампах. Оценочный расчет показателя напряженного состояния в очаге деформации при осадке в профильных и гладких штампах находится в пределах  $-4,14 \leq \frac{\sigma}{T} \leq -1$ , поэтому при горячей деформации обеспечены благоприятные условия для залечивания пор литейного происхождения.

**В третьей главе** проведен сравнительный анализ неоднородности деформации при толстолистовой прокатке, выполненный методом тонких сечений и конечно-разностным методом, дана оценка напряженного состояния и разрушения металла при прокатке листа. С помощью программных комплексов DEFORM-3D и Q-FORM установлены количественные характеристики

неравномерности деформации по высоте проката в зависимости от калибровки инструмента и режимов черновой прокатки на стане 5000.

Изучались три прохода прокатки на стане 5000 ОАО «ММК», а именно первый, последний и тринадцатый проходы: на 1-ом проходе начальная высота непрерывно-литого сляба равнялась  $h^1_0 = 300$  мм, на тринадцатом проходе –  $h^{13}_0 = 67,4$  мм и на двадцать первом –  $h^{21}_0 = 30,5$  мм. Оценка деформированного состояния при прокатке листа проводилась по результатам расчетов степени деформации  $\varepsilon_{ui}$  с различными высотными координатами (P1...P9), где P1 – частица на контакте заготовки с валком ( $z = h/2$ ); P9 – частица на плоскости симметрии ( $z = 0$ ) (рисунок 3).

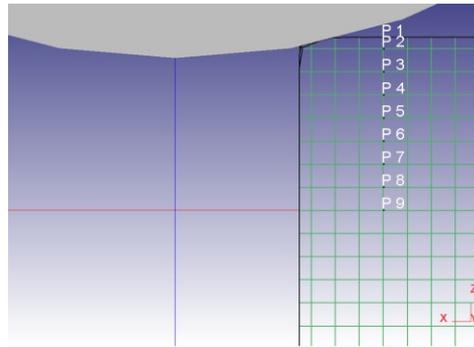


Рисунок 3 – Положение девяти частиц металла (P1...P9) по высоте листа

Среднее значение степени деформации в сечении полосы после прокатки определялось из выражения  $\overline{\varepsilon}_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ui}$ ,  $i$  – номер частицы,  $2n = 17$ . Неравномерность распределения степени деформации по высоте листа оценивалась с помощью коэффициента вариации  $S/\overline{\varepsilon}_u$ , где  $S = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{ui} - \overline{\varepsilon}_u)^2 \right]^{1/2}$  – среднеквадратичное отклонение.

Результаты расчетов показали, что для первого прохода ( $l/h_{cp} \approx 0,5$ ) степень деформации на контакте с валком в 2,5 раза больше, чем на плоскости симметрии. Коэффициент вариации  $S/\overline{\varepsilon}_u$ , рассчитанный по программам DEFORM-3D и Q-FORM, соответственно равен 0,315 и 0,30. Эти значения свидетельствуют о значительной неоднородности деформации по сечению полосы. Для 13-го ( $l/h_{cp} \approx$

0,9) и 21-го ( $l/h \approx 1,35-1,48$ ) проходов степень деформации в приконтактной области и в центральной зоне листа различается в 1,10–1,5 раза, а значения коэффициента вариации равны соответственно 0,13 и 0,12 по программе DEFORM-3D и 0,06 – по Q-FORM. Сравнение результатов расчетов среднего значения степени деформации по высоте полосы  $\bar{\varepsilon}_u$ , полученных по программам DEFORM-3D и Q-FORM и по формуле  $\varepsilon_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h_0}{h_1}$ , свидетельствуют о том, что предположение о монотонном и однородном по высоте характере распределения степени деформации при прокатке дает заниженный результат: значения  $\varepsilon_u$  меньше  $\bar{\varepsilon}_u$  в 1,1÷1,25 раза.

В работе дана оценка напряженного состояния при обжатии листа для трех проходов прокатки стана 5000 ОАО «ММК»: первого, тринадцатого и двадцать первого. Значения показателей напряженного состояния в очаге деформации определялись, используя гипотезу тонких сечений и граничные условия равенства нулю переднего и заднего натяжений полосы. Показано, что прокатке высокого сляба в первом проходе показатель напряженного состояния  $\frac{\sigma}{T}$  в 1,8 раза больше, а ресурс пластичности стали ЗСП в 2,4 раза меньше, чем при прокатке листа в последнем проходе ( $l/h \approx 1,35-1,48$ ).

В работе предложен новый способ прокатки литого сляба, направленный на повышение качества проката путем интенсификации деформации в объеме заготовки. Способ характеризуется знакопеременной деформацией и способствует сохранению формы и размеров заготовки в исходном состоянии. Предлагаемый способ прокатки заготовки осуществляется в два этапа знакопеременной деформации – в валках с профилированной, а затем с гладкой бочкой рабочих валков.

Реализация способа предполагает применение валков с профилированными рабочими валками в первой клетки и с валками с гладкой бочкой во второй клетки. Валковый узел первой клетки представлен на рисунке 4: 1 – заготовка; 2 – вертикальные не приводные валки; 3 – горизонтальные приводные валки; 4 и 5 – кольцевые бурты и ручки на бочке горизонтальных валков. Предлагаемый

валковый узел позволяет прокатывать заготовки с неизменной шириной  $B = const$ , что способствует повышению однородности деформационной проработки литой структуры в объеме раската. Для предотвращения уширения металла при прокатке в паре с горизонтальными приводными валками применяются вертикальные не приводные валки с зазором между ними равным ширине сляба  $B$  в исходном состоянии.

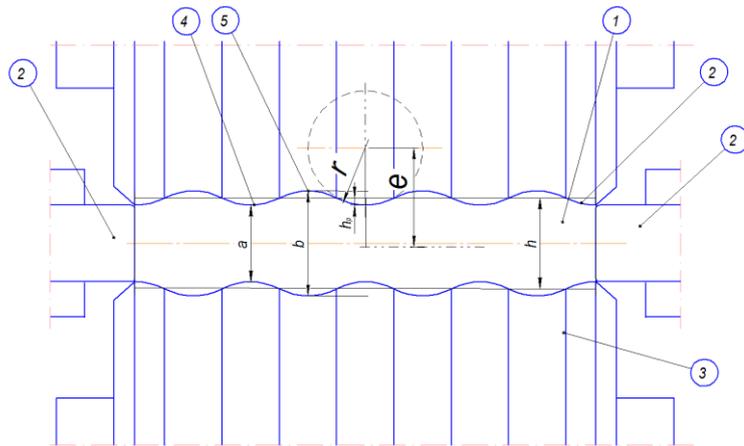


Рисунок 4 – Валковый узел

На поверхности бочки горизонтальных приводных валков чередуются кольцевые бурты 4 и ручьи 5, причем радиус профиля ручьев  $r$  равен радиусу профиля буртов  $r$ , а расстояния между линиями центров цилиндрических поверхностей буртов и ручьев определяется параметром  $e$ . Валки устанавливаются с зазором между вершинами кольцевых буртов на величину  $a = h - \Delta h$  а между вершинами кольцевых ручьев – на величину  $b = h + \Delta h$ , где  $h$  – высота прокатываемой полосы,  $\Delta h$  – высота сектора окружности кольцевого ручья, определяемая из выражения  $\Delta h/2 = r - e/2$ ;  $\Delta h = 2r - e$  (см. рисунок 4).

В программе DEFORM-3D были поставлены и решены задачи КЭ-моделирования нового способа прокатки толстого листа. Результаты решения задач МКЭ-моделирования позволили определить рациональную калибровку профилированных валков из условия минимизации обжатия за проход при ограничениях – обеспечить наибольшее значение степени деформации и минимальное значение параметра неоднородности деформации.

Для проверки целесообразности применения предлагаемого способа прокатки литого сляба, ставилась задача сравнительного анализа деформированного состояния при прокатке сляба в валках с гладкой бочкой за один проход прокатки и в два прохода – обжатие заготовки в валковом узле предложенной конструкции с последующим выравниванием поверхности полосы и с обеспечением знакопеременной деформации. По результатам расчетов, полученных из решения задач МКЭ-моделирования в программе DEFORM, было отмечено, что предлагаемый способ прокатки по сравнению с существующим способом, позволяет повысить среднюю степень деформации  $\overline{\varepsilon_{\Sigma u}}$  в 2 раза, а показатель однородности деформации по толщине листа ( $S/\overline{\varepsilon_{\Sigma u}}$ ) снизить в 1,3 раза.

В работе разработан и исследован альтернативный способ прокатки непрерывно-литой заготовки с интенсивной знакопеременной деформацией. Предложена методика расчета рациональной калибровки валков с волнообразным профилем бочки (рисунок 5) из условия достижения однородности распределения степени деформации по высоте проката при минимальных изменениях размеров исходной заготовки.

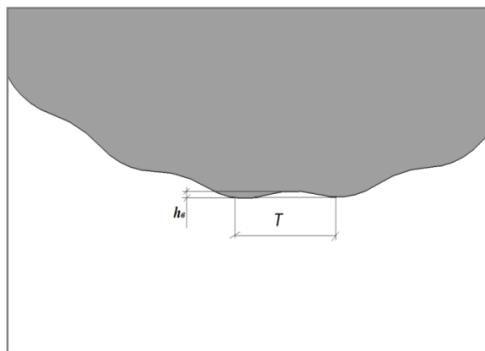


Рисунок 5 – Валок с волнообразным профилем бочки

Результаты компьютерного моделирования процесса прокатки полос в валках с волнообразным профилем бочки показали, что средняя степень деформации  $\overline{\varepsilon_{\Sigma u}}$  в 1,25-1,5 раза больше, а коэффициент вариации  $S/\overline{\varepsilon_{\Sigma u}}$  – в 1,5-2 раза меньше, по сравнению с существующим способом прокатки заготовки в

валках с гладкой бочкой. Получение в первом проходе полосы с выступами и углублениями на поверхности будет способствовать уменьшению коэффициента вытяжки и созданию условий для обеспечения знакопеременной деформации в очаге деформации при прокатке заготовки в два прохода, что позволит обеспечить удовлетворительное проникновение деформации в осевую зону слитка и однородное распределение степени деформации в объеме заготовки при минимальных изменениях ее размеров.

Таким образом, было установлено, что реализация способов прокатки в два прохода обеспечит повышение качества проката за счет интенсивной знакопеременной деформации в очаге деформации при минимальном изменении размеров и с сохранением формы заготовки. Проведенные исследования показали, что усовершенствование существующего процесса продольной прокатки листа позволит разработать технологические схемы проката с применением непрерывно-литой заготовки уменьшенных размеров и с уменьшением трудозатрат на производство продукции.

**В четвертой главе** была предложена технологическая схема прокатки толстого листа для условий ЛПЦ-9 ОАО «ММК». Новая схема прокатки отличается от существующей тем, что в линии с реверсивной клетью кварто 1 (рисунок 6) устанавливаются две универсальные клетки дуо, рабочие валки которых вращаются от привода валков стана кварто. Клеть 2 имеет рабочие валки с профилированной поверхностью бочки в виде буртов и ручьев 6, а также неприводные вертикальные (эджерные) валки 8. Вторая клеть 3 имеет рабочие валки с гладкой поверхностью бочки 7, а также неприводные вертикальные валки 8. Схема главной линии клетей представлена на рисунке 6: 1 – реверсивная клеть кварто; 2 и 3 – 1-я и 2-я клетки дуо; 4 – опорные валки клетки кварто; 5 – рабочие валки клетки кварто; 6 – рабочие валки 1-ой клетки дуо; 7 – рабочие валки 2-ой клетки дуо; 8 – эджерные валки 1-ой и 2-ой клетки дуо; 9 – станины; 10 – механизмы установки верхнего валка; 11 – траверсы; 12 – подушки с подшипниками; 13 – плитовины; 14 – фундаментные болты; 15 – универсальные шпиндели; 16 – устройство для уравнивания шпинделей; 17 – промежуточный вал; 18 – моторная муфта; 19

– главный электродвигатель (см. рисунок 4.1). Входная и выходная стороны стана кварто оборудована механизмами передачи сляба от клетки кварто к клетям дуо.

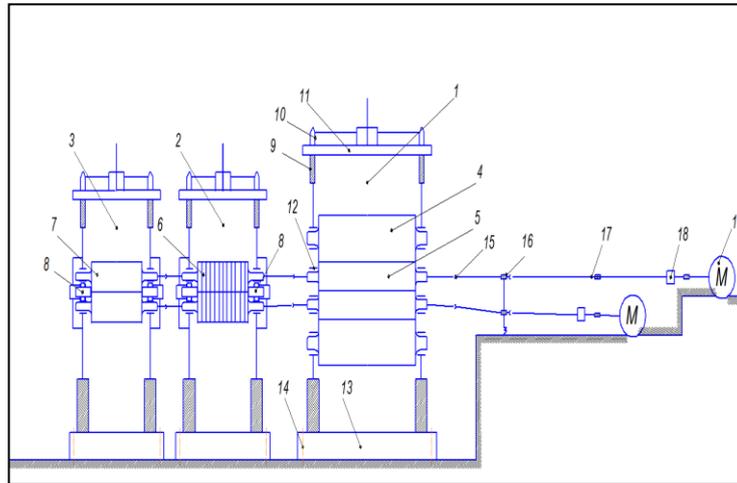


Рисунок 6 – Схема главной линии рабочих клеток Дуо и Кварто

Для лучшей проработки литой структуры полоса передается к 1-ой клетки дуо, а после – ко 2-ой клетки дуо. При этом совершается один цикл знакопеременной деформации. После проведения необходимого числа циклов знакопеременной деформации, количество которых определяется выбранным сортаментом и требованиями к качеству листа, полоса передается к клетки кварто. Прокатку в реверсивной клетки кварто осуществляют в соответствии с принятыми режимами обжатий – проводят разбивку ширины листа, прокатку в черновых и чистовых проходах до получения требуемых размеров готового листа.

На основе предложенной схемы прокатки заготовки разрабатывался технологический режим прокатки с обеспечением в первых двух черновых проходах знакопеременной деформации непрерывно-литого сляба уменьшенных размеров. В основе расчетов был принят технологический режим прокатки на стане 5000 ОАО «ММК» для листов размерами 15,0x4378x11800мм из стали категории прочности К60 по ТУ 14-1-5574-2009.

В результате проведенных расчетов было установлено, что прокатка сляба размерами 160x2500x4200 мм, по новой схеме, позволит получить раскат размерами 15,0x4504,5x24862,3 мм за 23 прохода (8 черновых и 15 чистовых

проходов. Предлагаемая схема прокатки позволит снизить количество черновых проходов с одиннадцати до восьми.

Для оценки эффективности предложенного технологического режима прокатки листа, со ЗПД непрерывно-литого сляба в первых проходах, проводился анализ деформированного состояния в очаге деформации и энергосиловых параметров прокатки по двум режимам (существующему и разработанному). С использованием программного комплекса DEFORM-3D были решены задачи МКЭ-моделирования черновых проходов прокатки листа. В результате компьютерного моделирования установлено, что при прокатке по разработанному технологическому режиму, по сравнению с существующим способом прокатки, удастся обеспечить проникновение деформации в осевую зону проката: суммарная степень деформации  $\varepsilon_{\Sigma u}$  в осевой зоне в 1,15-1,2 раза выше (кривая 2 и 3, рисунок 7), чем по существующей схеме прокатки в клетях кварто за 11 проходов (кривая 1, рисунок 7). Кроме того, применение клеток дуо с профилированными и гладкими валками в первых проходах прокатки литого сляба позволяет снизить неоднородность распределение степени деформации – коэффициент вариации  $S/\overline{\varepsilon_{\Sigma u}}$  в 6 раз меньше, чем при черновой прокатке по существующей схеме (рисунок 8).

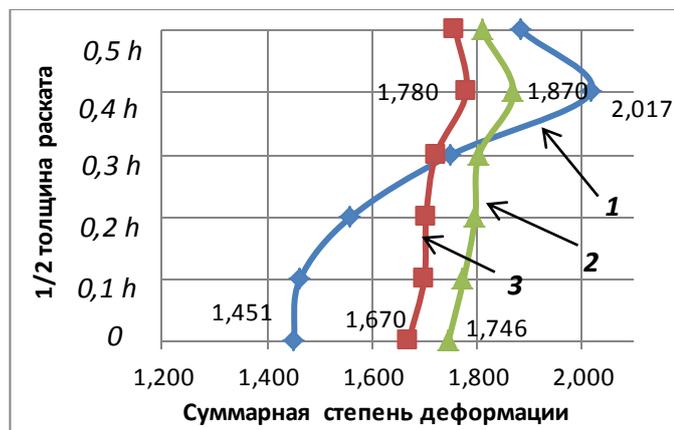


Рисунок 7 – Распределение суммарной степени деформации  $\varepsilon_{\Sigma u}$  по высоте проката

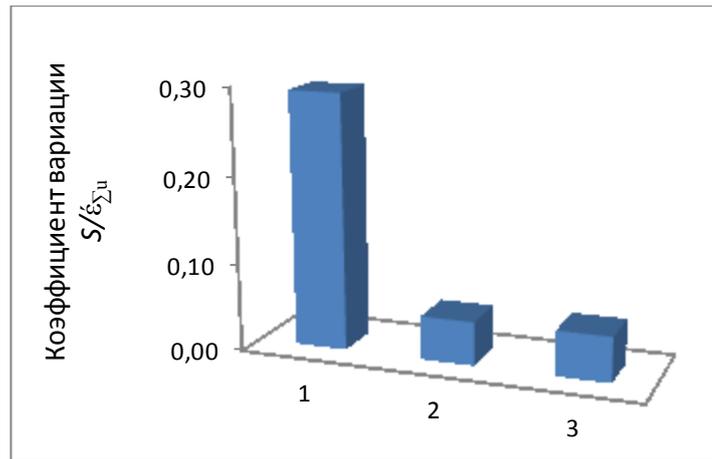


Рисунок 8 – Коэффициент вариации  $S/\overline{\epsilon_{\Sigma u}}$

Анализ энерго-силовых параметров прокатки показал, что применение знакопеременных этапов деформации в первых проходах прокатки литого сляба (с уменьшенными размерами –  $h_0=160$  мм) способствует снижению энерго-силовых параметров процесса продольной прокатки: суммарное усилие черновой прокатки снижается в 1,8 раза, а работа (энергия) прокатки на выполнение черновых проходов – в 2 раза (рисунок 9-10).

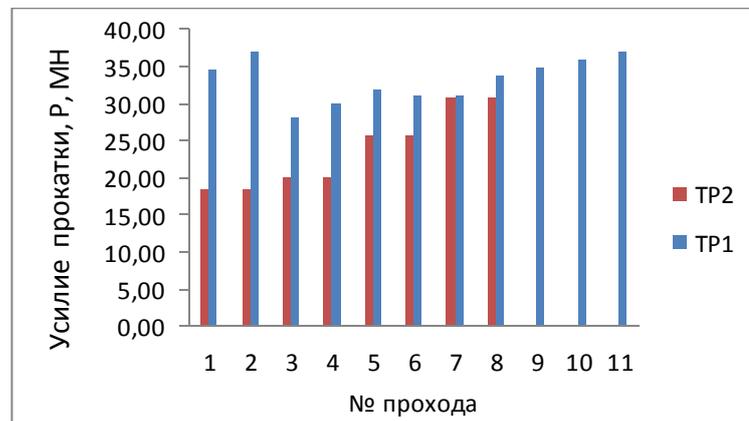


Рисунок 9 – Распределение усилий прокатки в черновых проходах по двум режимам:

TP1 – с применением стана кварто 5000; TP2 – с применением в линии стана 5000 две клетки дуо для первых двух проходов прокатки

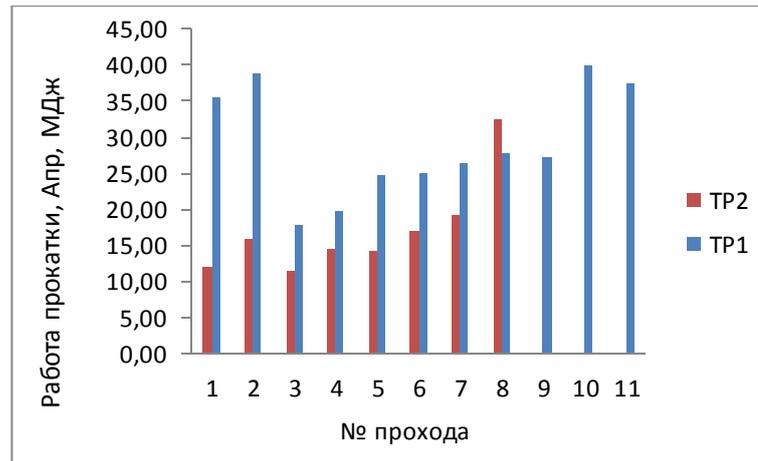


Рисунок 10– Распределение работы прокатки по черновым проходам для двух режимов:

TP1 – с применением стана кварто 5000; TP2 – с применением в линии стана 5000 две клетки дуо для первых проходов прокатки

Выполненный сравнительный анализ деформированного состояния и энергосиловых параметров при черновой прокатки заготовки по двум схемам показал, что предложенный технологический режим прокатки обеспечивает однородность деформационной проработки литого сляба, а также снижение энерго- и трудозатрат при производстве листа на стане 5000 ОАО «ММК».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы достигнута поставленная цель и получены следующие результаты:

1. Требуемые эксплуатационные характеристики сталям можно обеспечить формированием в металле однородной в объеме ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры. Перспективным является развитие идеи интенсификации процессов обработки металлов давлением, а также разработки новых схем деформации заготовки, в которых реализуется немонотонный характер течения частиц металла при прокатке. Однако, освоение в промышленности способов для получения УМЗ материалов требует разработки новых технических решений.

2. Актуальной задачей является повышение степени и однородности деформации в объеме литой заготовки, формирование однородной структуры толстолиствого проката за счет обеспечения интенсивной знакопеременной деформации непрерывно-литого сляба в условиях действия сжимающих напряжений.

3. Разработан новый способ протяжки слитков с интенсивной знакопеременной деформацией с сохранением формы и размеров заготовки. Предложено техническое решение по конструкции нового инструмента деформации и технологииковки литых слитков, обеспечивающие знакопеременную деформацию заготовки при протяжке.

4. Изучены закономерности формоизменения и распределения деформации по сечению непрерывно-литого сляба при протяжке и двух альтернативных способах прокатки

5. Научно обоснованы рациональные условия появления знакопеременной деформации при протяжке и толстолистной прокатке литых слябов.

6. Предложен показатель неоднородности накопленной степени деформации в объеме заготовки, в виде коэффициента вариации  $S/\bar{\epsilon}_v$ , удобный для анализа и прогнозирования качества структуры при прокатке.

7. Предложены и исследованы способы толстолистной прокатки, направленные на обеспечение интенсивной знакопеременной деформации в очаге деформации при минимальных изменениях размеров заготовки. Результаты проведенных исследований новых способов прокатки в два прохода показали, что их применение обеспечит повышение эффективности процесса толстолистной прокатки.

8. Создана методика расчета рациональной калибровки валков из условия достижения максимальной амплитуды и однородности знакопеременной деформации по высоте проката при минимальном обжатии за проход.

9. Разработана новая схема прокатки толстого листа с уменьшенным числом черновых проходов по сравнению с существующей схемой прокатки – с

11 до 8. Реализация нового технологического режима позволяет обеспечить проникновение деформации в осевую зону проката: суммарная степень деформации  $\varepsilon_{\Sigma u}$  в осевой зоне в 1,15-1,2 раза выше, чем по существующему режиму прокатки толстого листа, а неоднородность деформации по сечению снижается в 6 раз.

10. Анализ энерго-силовых параметров черновой прокатки заготовки по двум схемам показал, что предложенный технологический режим прокатки обеспечивает снижение энерго- и трудозатрат при производстве листа на стане 5000 ОАО «ММК»: суммарное усилие черновой прокатки снижается в 1,8 раза, а работа (энергия) прокатки на выполнение черновых проходов – в 2 раза.

**Перспективы** дальнейшей разработки темы. Полученные в диссертации научные обоснования новых способов прокатки и кузнечной протяжки высоких заготовок в условиях интенсивной знакопеременной деформации рекомендуется продолжить проведением лабораторных и промышленных экспериментов для изучения влияния режимов прокатки по новой схеме на структуру и механические свойства толстолистовой стали. С результатами диссертационной работы следует ознакомить специалистов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ОАО «Северсталь» и ОАО «Выксунский металлургический завод».

В целом в диссертационной работе выполнено научное обоснование новых способов прокатки и кузнечной протяжки непрерывно-литых заготовок в условиях интенсивной знакопеременной деформации, а также разработана на их основе новая технологическая схема проката за счёт применения фундаментальных положений механики обработки металлов давлением и современных средств компьютерного моделирования, что имеет существенное значение для теории и практики обработки металлов давлением.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**  
**Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. Нухов Д.Ш. Конечно-элементное моделирование процесса толстолистовой / Д.Ш. Нухов, А.А. Богатов, К.П. Пьянков // *Металлург.* – 2013. – № 2. – С. 19-23 (0,25 п.л./ 0,08 п.л)

Nukhov D.Sh. Finite-Element Modeling of Plate-Rolling. / D.Sh. Nukhov, A.A. Bogatov, K.P. P'yankov // *Metallurgist.* – 2015. –Vol. 59. – Issue: 1-2 – P. 113-118 (0,3 п.л./0,1 п.л.).

2. Нухов Д.Ш. Научные основы повышения эффективности процессаковки при знакопеременной деформации / Д.Ш. Нухов, А.А. Богатов // *Заготовительные производства в машиностроении (Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства).* – 2015. – № 5. – С. 13-18 (0,3 п.л./0,1 п.л.).

3. Нухов Д.Ш. Разработка рациональных режимов нового процесса кузнечной протяжки полос с применением компьютерного моделирования / Д.Ш. Нухов, А.А. Богатов // *Производство проката.* – 2015. - № 3. – С. 3-7 (0,25 п.л./0,08 п.л.).

4. Нухов Д.Ш. Конечно-элементное моделирование кузнечной протяжки полос без изменения формы и размеров в условиях знакопеременной деформации / Д.Ш. Нухов, А.А. Богатов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2015. - № 6. – С. 442-448 (0,44 п.л./0,13 п.л.).

***Другие публикации:***

5. Nukhov D.Sh. FEM-simulation of plate rolling process, analysis of inhomogeneous deformation and indexes of stress state in the deformation zone / D.Sh. Nukhov, A.A. Bogatov, K.P. P'yankov // *COMAT 2014: труды международной научной конференции, г. Пльзень.* – Чехия, 2014. – С. 320–327 (0,4п.л./0,12 п.л.).

6. Нухов Д.Ш. Конечно-элементное моделирование процесса толстолистовой прокатки Анализ неоднородности деформации показателей напряженного состояния в очаге деформации / Д.Ш. Нухов, А.А. Богатов, К.П. Пьянков // *ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и*

технологии: труды международного научного конгресса. – М.: Белый ветер, 2014. – С. 208–215 (0,5 п.л./0,15 п.л.).

7. Нухов Д.Ш. Конечно-элементное моделирование процесса толстолистовой прокатки / Д.Ш. Нухов, А.А. Богатов, К.П. Пьянков // Новые технологии и достижения в металлургии и материаловедении: труды XV международной научной конференции, г. Ченстохова. – Польша, 2014. – С. 194–201 (0,5 п.л./0,15 п.л.).

8. Нухов Д.Ш. Деформация, напряжение и разрушение металла при листовой прокатке / Д.Ш. Нухов, А.А. Богатов // Новые технологии и достижения в металлургии и материаловедении: труды XVI международной научной конференции, г. Ченстохова. – Польша, 2015. – С. 180–185 (0,37 п.л./0,11 п.л.).

9. Нухов Д.Ш. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при толстолистовой прокатке с использованием программ КЭ-моделирования / Д.Ш. Нухов, А.А. Богатов, К.П. Пьянков // Пластическая деформация металлов: труды международной научной конференции, г. Днепрпетровск, Украина. – Днепрпетровск, 2014. – С. 18–22 (0,3 п.л./0,1 п.л.).

10. Нухов Д.Ш. МКЭ-моделирование процесса толстолистовой прокатки. Анализ неоднородности напряженно-деформированного состояния в очаге деформации / Д.Ш. Нухов, А.А. Богатов, К.П. Пьянков // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: труды VIII международной молодежной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 185–189 (0,3 п.л./0,1 п.л.).

11. Нухов Д.Ш. Научные основы повышения эффективности процессаковки при знакопеременной деформации / Д.Ш. Нухов, А.А. Богатов // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: труды VIII международной молодежной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 470–474 (0,3 п.л./0,1 п.л.).

12. Нухов Д.Ш. Исследование особенностей формоизменения металла и однородности деформации при горячей толстолистовой прокатке / Д.Ш. Нухов,

А.А. Богатов, К.П. Пьянков // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии: сб. науч. трудов I Международной научно-технической конференции. – Череповец: Череповецкий государственный университет, 2013. – С. 22–30 (0,45 п.л./0,13 п.л.).

13. Нухов Д.Ш. Разработка нового способа кузнечной протяжки слитков в условиях интенсивной знакопеременной деформации / Д.Ш. Нухов, А.А. Богатов // Трубы 2014: труды XXI международной научно-практической конференции. – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2014. – С. 75-80 (0,3 п.л./0,1 п.л.).

14. Нухов Д.Ш. Разработка способа кузнечной протяжки без изменения формы и размеров исходной заготовки / Д.Ш. Нухов, А.А. Богатов // СММТ'15: труды XII международной научно-технической конференции. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2015. – С. 1158-1166 (0,45 п.л./0,13 п.л.).