

ПШРЗ было выплавлено более 30 плавов марочного металла. Все они по химическому составу и свойствам полностью соответствовали требованиям действующих технических условий.

Выводы

1. Освоена технология выплавки ПШРЗ ЭП718 в дуговой печи емкостью 20т с кислородным рафинированием и последующей внепечной обработкой на АВОС-20, включающей в себя продувку металла инертным газом, вакуумирование и модифицирование металла.

2. Предложенная технология позволила значительно повысить производительность, получить шихтовую рафинированную заготовку с известным химическим составом, низким содержанием углерода, газов и вредных примесей, снизить угары легирующих элементов.

3. Качество полученной заготовки позволило использовать ее на выплавку марочного металла в вакуумных индукционных печах без дополнительного вакуумного дугового переплава.

Список литературы

1. Сидоров В.В. Металлургия литейных жаропрочных сплавов. Сб. «Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технологии, покрытия)». - М.: Наука, 2006, с.119-186.

2. Муруев С.В., Шильников Е.В., Падерин С.Н. Распределение кислорода на окисление компонентов металлической ванны в окислительный период на плавках стали X18H10T в 20т дуговой печи. / Электromеталлургия 2015 №4. - с.12-16.

3. Римкевич В.С., Сисев А.А., Муруев С.В., Блохин М.В. Возможности совершенствования традиционной технологии выплавки нержавеющей сталей. / Бюллетень Черная Металлургия 2012 №8. - с.23-28.

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТА

Панковец И.А.

ОАО "БМЗ - управляющая компания холдинга "БМК", г. Жлобин

Аннотация. Рассмотрены актуальные технологические проблемы, связанные с производством сортового проката в прутках на действующем производстве стана 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»: неудовлетворительное качество поверхности сортового проката; повышенный расход металла при производстве продукции; неудовлетворительные геометрические размеры поперечного круглого профиля. Проведено численное моделирование процесса проката максимально приближенное к реальным условиям. Используя математическое моделирование, удалось получить достоверные результаты исследования для дальнейшего снижения затрат на производство, совершенствования качества поверхности конечного изделия и разработать новые технологии производства сортового проката. Представлены результаты решения ряда практических задач: разработан алгоритм системы определения оптимального раскрытия сортового проката; разработаны технологические решения, препятствующие образованию дефектов поверхности прокатного происхождения в черновой группе клеток; разработана новая схема калибровки, позволяющая получать высокоточную геометрию поперечного профиля с контролируемым межклетьевым натяжением.

Ключевые слова: горячая прокатка, прокатный стан, математическое моделирование, совершенствование технологии, качество поверхности, калибровка профиля валков, межклетьевое натяжение, высокоточная геометрия сортового проката.

В современных условиях развития и глобализации мировой экономики перед металлургическими предприятиями, с особой остротой, стоят проблемы повышения конкурентоспособности продукции на внешних рынках. Крупные потребители – мировые лидеры в сфере металлообработки и машиностроения – в сложившихся условиях требуют от поставщиков выполнения принятых ими корпоративных стандартов, жестко

регламентирующих процессы производства и контроля качества продукции на всех переделах, с учетом политики корпораций в области обеспечения качества и экологии. Это обстоятельство требует постоянного совершенствования и модернизации действующих технологий, оборудования, средств контроля качества и технологической документации для обеспечения требуемого качества продукции в соответствии с признанными мировыми, государственными и корпоративными стандартами качества.

Одним из способов достижения высокой производительности с сохранением качества продукции является математическое моделирование процесса прокатки с последующим глубоким анализом и выдачей рекомендаций по совершенствованию производственных процессов.

Математическое моделирование процесса прокатки – наиболее перспективный способ определения специфических условий, энергосиловых и физико-механических показателей технологического процесса. При использовании математического моделирования создается имитация реального процесса, который позволяет оценить распределение нагрузок на прокатные клетки. Моделирование процесса прокатки осуществляется с помощью метода конечных элементов (далее – МКЭ) [1]. МКЭ – современный инструмент, позволяющий совершенствовать технологические процессы. На ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» накоплен богатый опыт применения сторонних программ математического моделирования для анализа пластического формоизменения гомогенных материалов в прокатном производстве, но также имеется опыт разработки и внедрения собственных математических моделей в производстве.

Разработка и внедрение металлосберегающих технологий в прокатном производстве. В основе работы лежит разработка и внедрение металлосберегающих технологий в прокатном производстве, позволяющих значительно сократить количество несоответствующей продукции. При этом произведено математическое моделирование процесса раскря сортового проката в прутках без использования МКЭ. Значительный положительный результат в работе достигнут благодаря исследованию, учету и математическому описанию всех факторов, влияющих на расход металла при производстве одной условной тонны продукции. Основной принцип по раскря сортового проката базируется на фундаментальном законе о сохранении массы. В свою очередь, баланс металла на одной заготовке можно описать как масса металла, заданного в производство, равная сумме массы потерь металла при производстве с массой готового продукта. Исследуя и анализируя процесс раскря сортового проката, разработана математическая модель расчета массы исходной заготовки по формуле 1:

$$M_{\text{заг}} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot D_{\text{гот}}^2 \cdot L_{\text{рас}}}{4 \cdot \left(1 - \frac{\text{пугар}}{1000}\right)} + \frac{D_{\text{нож1}}^2 \cdot V_{\text{нож1}}}{D_{\text{гот}}^2} + \frac{D_{\text{нож2}}^2 \cdot V_{\text{нож2}}}{D_{\text{гот}}^2} + \frac{D_{\text{нож3}}^2 \cdot V_{\text{нож3}}}{D_{\text{гот}}^2} + V_{\text{пил}} \quad (1)$$

где $L_{\text{рас}}$ – длина штанги на холодильнике, мм;

$D_{\text{гот}}$ – номинальный диаметр готового сорта, мм;

π – математическая константа, 3,14;

ρ – плотность стали, 0,0000078 кг/мм³;

пугар – величина угара в нагревательной печи;

$D_{\text{нож1}}$ – диаметр раската при резке на ножах № 1, мм;

$D_{\text{нож2}}$ – диаметр раската при резке на ножах № 2, мм;

$D_{\text{нож3}}$ – диаметр раската при резке на ножах № 3, мм;

$V_{\text{нож1}}$ – объем обреза при резке на ножах № 1, мм³;

$V_{\text{нож2}}$ – объем обреза при резке на ножах № 2, мм³;

$V_{\text{нож3}}$ – объем обреза при резке на ножах № 3, мм³;

$V_{\text{пил}}$ – объем потерь металла при обрезке дефектных концевых участков и при резке на мерные длины, обусловленные шириной реза, мм³. [2]

Определив уравнение баланса металла, проведена работа по решению основной задачи – возможности прогнозирования и управления длиной порезки раската на мерные прутки.

Для оперативного раскроя сортового проката на мерные прутки, а также для расчета массы заготовки разработана математическая модель, включающая в себе сбор и анализ данных полученных непосредственно от системы слежения за производством. Математическая модель представляет собой программный комплекс, который состоит из трех различных вариантов расчета:

- вариант 1 – расчет предполагает равномерный раскрой заготовки (раската) на равные штанги (равномерное деление раската на равные части);
- вариант 2 – расчет основан на принципе проката с короткой (либо более длиной) последней штангой при условии, что первые штанги будут одинаковой длины;
- вариант 3 – расчет исходной массы заготовки для последующего равномерного деления раската без остатка.

По результатам внедрения математической модели в производственный процесс, удалось достигнуть снижения расхода металла на производство одной условной тонны продукции на 12%.

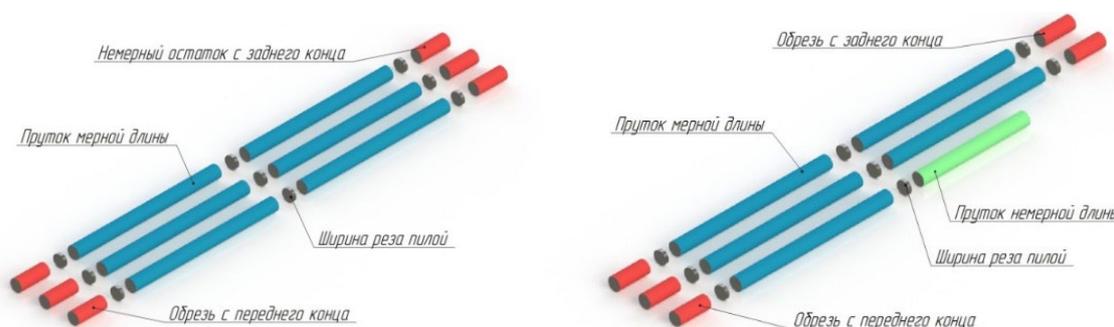


Рисунок 1. Раскрой раската на равные части и с немерной длиной

Разработка и внедрение технологических решений, препятствующих образованию дефектов поверхности прокатного происхождения. Для разработки мероприятий, направленных на улучшение качества поверхности, необходима правильная классификация дефектов и определение условий их образования. Проведенные металлографические исследования позволили установить, что дефекты, выявляемые цеховыми установками при отделке прутка, не унаследованы с непрерывнолитой заготовки (НЛЗ), а образовались в процессе пластической деформации.

Большинство исследованных поверхностных дефектов представляли собой раскрытые разрывы, расположенные поперек либо под углом к направлению наибольшей вытяжки металла при прокатке – «деформационную рванину», а также группы чередующихся продольных углублений и выступов – «морщины». Поверхностные дефекты располагались как по всей длине прутков, так и имели периодический характер. Глубина варьировалась в пределах от 0,1 до 2,5 мм.

Кроме того, металлографический контроль позволил установить, что в большинстве случаев расположение дефектов соответствовало углам НЛЗ (рисунок 2).

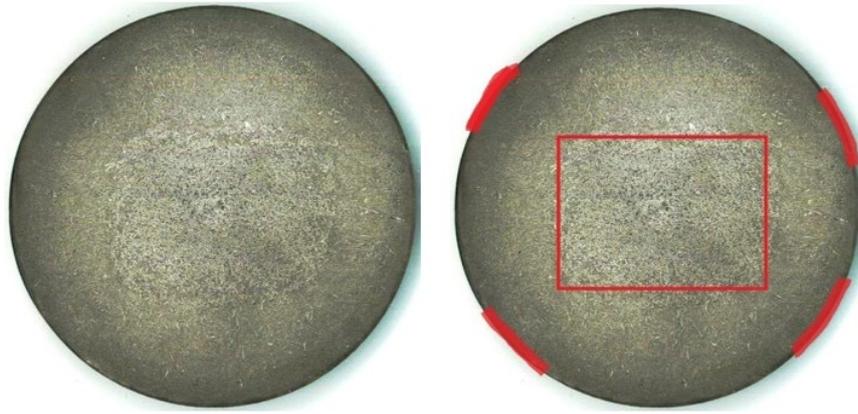


Рисунок 2. Расположение поверхностных дефектов на макротемплете металлопроката

Одной из вероятных причин образования исследованных дефектов является пониженная пластичность металла при повышенных обжатиях боковых граней.

Для подтверждения этого проведено математическое моделирование процесса деформации слитка в прокатных валках.

В качестве объекта исследования выбраны клетки черновой группы, рисунок 3.

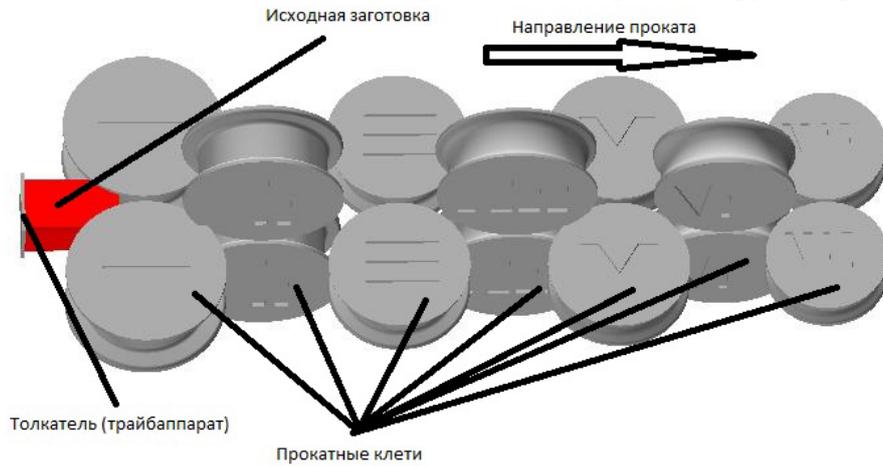


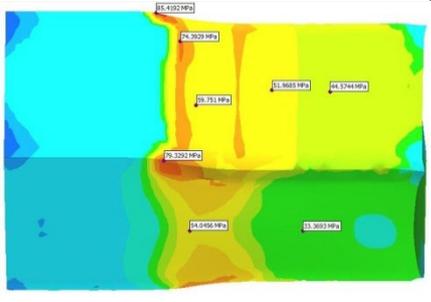
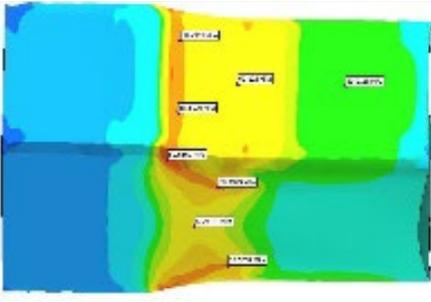
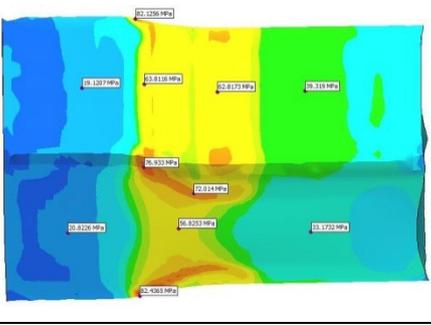
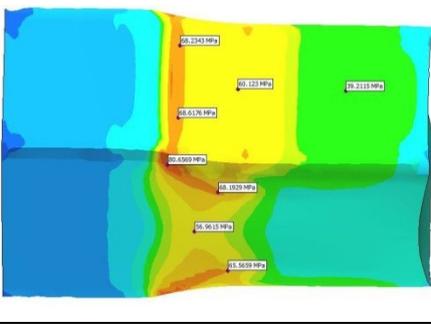
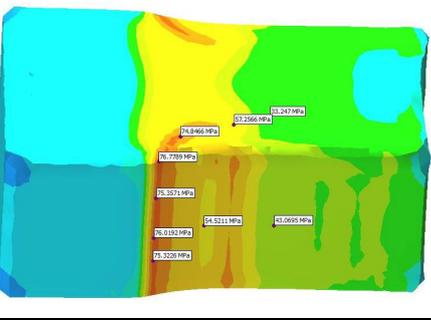
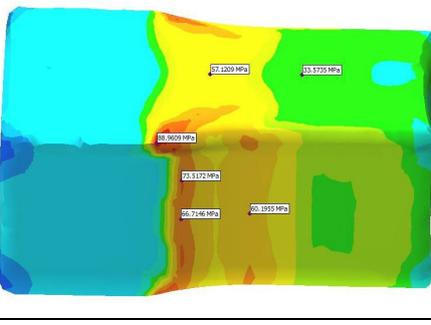
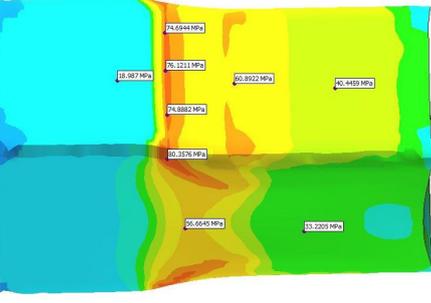
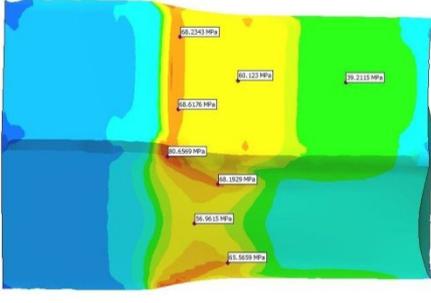
Рисунок 3. Математическая модель проката черновой группы клеток

В ходе исследования рассмотрены следующие факторы, влияющие на снижение пластичности:

- влияние радиуса скругления (сопряжения) граней бьюма;
- влияние коэффициента трения при прокатке (имитация износа калибра);
- влияние радиуса скругления (сопряжения) стенки с дном ящичного калибра;
- влияние температуры поверхности прокатного инструмента.

Таблица 1. Результаты моделирования процесса прокатки в первой клетке

Модель	Визуализация температурно-деформационных параметров прокатки	
Скругления 20 и 10 мм на исходной заготовке Выходные данные: σ_{max} - 78 МПа скругления 20 мм; σ_{max} - 81 МПа при скруглении 10 мм.		

<p>Скругления 0 и 10 мм на исходной заготовке</p> <p>Выходные данные: смах - 85 МПа скругления 0 мм; смах - 81 МПа при скруглении 10 мм.</p>		
<p>Различные коэффициенты трения К-1,0/ К-0,4</p> <p>Выходные данные: смах - 83 МПа, при коэфф трении 1; смах - 81 МПа при коэфф трении 0,4;</p>		
<p>Различные радиуса сопряжения калибров -R10/+R10</p> <p>Выходные данные: смах - 77 МПа, радиус -10 мм; смах - 89 МПа радиус +10 мм;</p>		
<p>Температура прокатного инструмента 20 °С/150 °С</p> <p>Выходные данные: смах - 81 МПа при температуре 150 °С; смах - 81 МПа при температуре 20 °С.</p>		

При исследовании стресс-факторов, влияющих на образование поверхностных дефектов сортового проката в прутках, определено следующее:

- прокатка заготовок с радиусом скругления (сопряжения) граней заготовки 20 мм не является значительным стресс-фактором, по сравнению с текущими условиями проката при радиусе скругления граней заготовки 10 мм;

- при прокате заготовок без радиуса скругления возрастает локальное напряжение в очаге деформации, при этом возрастает температурный градиент;

- при прокате заготовок с различными радиусами сопряжения в диапазоне от -10 до +10 от номинальной величины, значительных изменений не выявлено;

- при моделировании проката заготовок с износом и выработкой поверхности отмечено увеличение напряжения в очаге деформации на 10%; причиной является повышение шероховатости и отсутствие граничного трения между прокатываемым материалом и поверхностью вала;

- моделирование процесса проката с температурой поверхности валков 20 °С (имитация проката с интенсивным охлаждением валков) выявило локальное повышение

напряженного состояния и значительное снижение температуры поверхности раската, снижающее пластичность металла [3].

Итогом проделанной работы явилось изменение и дополнение технологической инструкции, что позволило одномоментно снизить дефектность производимой продукции с 2029 ppm до 56 ppm.

Исследования в области производства сортового проката с высокоточной геометрией поперечного профиля.

Оценив все преимущества математического моделирования методом конечных элементов, разработана новая концептуальная технология, позволяющая получить сортовой прокат с высокоточной геометрией поперечного профиля. Прототипом для создания новой технологии послужила действующая схема калибровки чистовых клетей прокатного стана диаметром 22-23 мм. Действующая схема калибровки, как показал статистический анализ, не способна обеспечить высокоточную геометрию сортового проката. В свою очередь освоение производства высокоточных геометрических размеров проката обеспечит конкурентное преимущество на рынке металлопродукции.

Процесс совершенствования и разработки новой технологии начат с исследования математических моделей прокатки в чистовых клетях с различными измененными технологическими параметрами. Систематизация и анализ полученных данных выявил зависимость изменения геометрических размеров профиля от частоты вращения валков чистовой клетки. Меняя частоту вращения чистовой клетки, относительно предчистовой, создается межклетьеовое натяжение раската, влияющее на геометрические размеры конечного изделия. Таким образом, сделан предварительный вывод – высокоточные геометрические размеры проката возможно получить при натяжении раската в межклетьеовом пространстве между чистовой и предчистовой клетями [4].

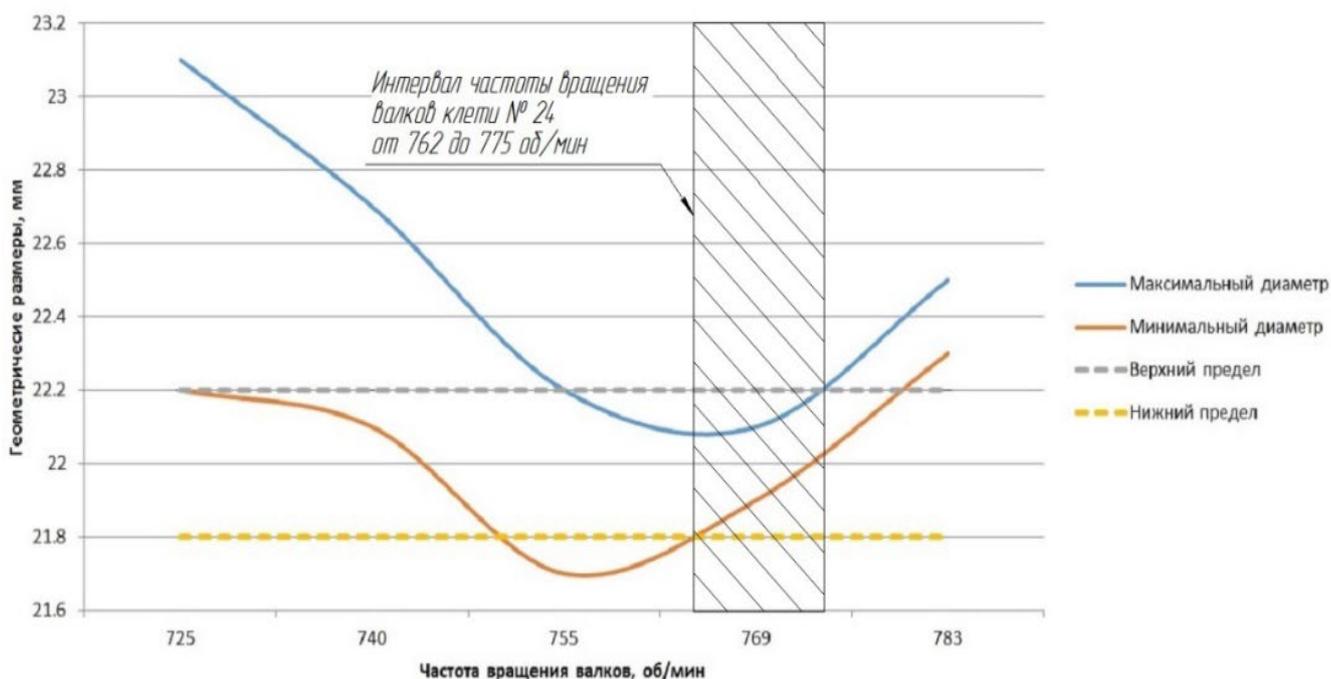


Рисунок 4. Зависимость геометрических размеров от частоты вращения чистовой клетки № 24 при производстве сортового проката номинальным диаметром 22 мм

Получив результаты геометрии поперечного профиля, полученные при моделировании процесса проката номинальным диаметром 22 мм с различными оборотами валков клетки №24, проведена оценка напряженного состояния согласно рисунку 5, результаты представлены в таблице 2.

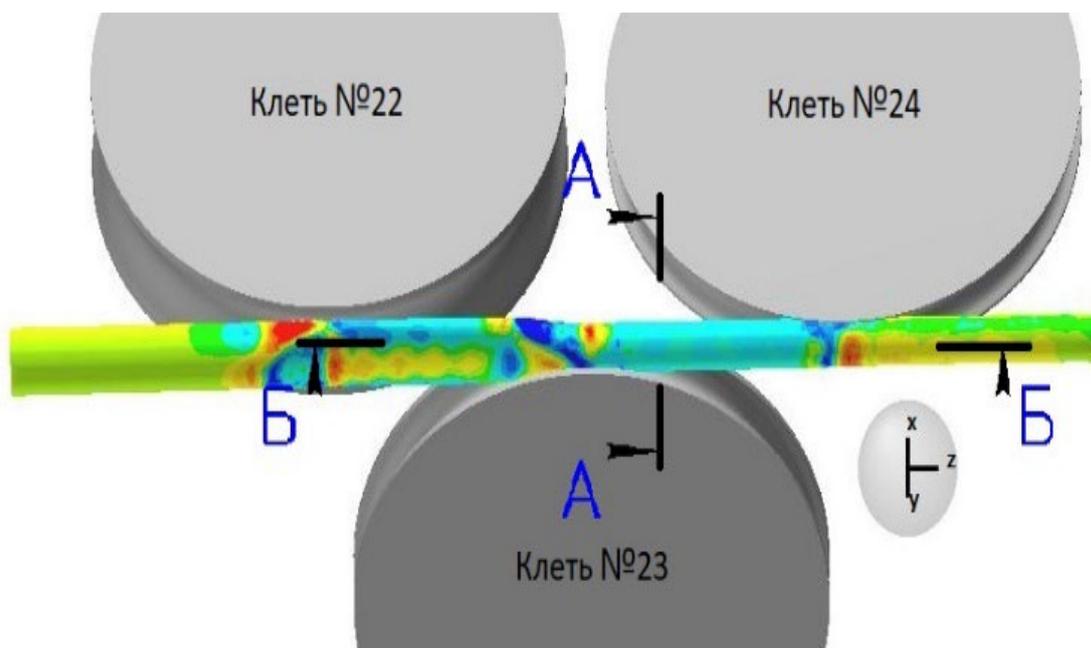


Рисунок 5. Схема выбора сечения напряженного состояния проката номинальным диаметром 22 мм (сечение А-А поперечное, сечение Б-Б продольное)

Таблица 2. Результаты моделирования процесса прокатки с подпором, свободной прокаткой и натяжением сортового проката номинальным диаметром 22 мм

Модель	Визуализация напряженного состояния в межклетьевом пространстве между клетями № 23 и № 24	
<p>Общее напряженное состояние/ напряженное состояние по оси Z Сечение А-А При прокате с подпором (-3% об/мин клетки №24)</p>		
<p>Общее напряженное состояние/ напряженное состояние по оси Z Сечение А-А Свободная прокатка (+0% об/мин клетки №24)</p>		

<p>Общее напряженное состояние/ напряженное состояние по оси Z Сечение А-А Прокатка с натяжением (+3% об/мин клетки №24)</p>		
<p>Общее напряженное состояние. Сечение Б-Б При прокате с подпором (-3% об/мин клетки №24)</p>		
<p>Общее напряженное состояние. Сечение Б-Б Свободная прокатка (+0% об/мин клетки №24)</p>		
<p>Общее напряженное состояние. Сечение Б-Б Прокатка с натяжением (+3% об/мин клетки №24)</p>		

Анализируя напряженное состояние в сечениях А-А и Б-Б, согласно рисунку 5 и таблице 2, выявлено следующее:

- при прокате с подпором (обороты клетки №24 снижены от номинала на 3%) наблюдается асимметричность напряженного состояния порядка 100 МПа как общего напряженного состояния, так и напряженного состояние по оси Z. При этом в сечении действуют силы, направленные как на сжатие, так и на растяжение (значительное искажение прямолинейности раската между клетями №23 и №24);

- при свободной прокатке (обороты клетки №24 без изменений) также наблюдается асимметрия напряженного состояния, однако, градиент составляет не более 35 МПа. При оценке напряженного состояние по оси Z наблюдаются силы, направленные только на сжатие (незначительное искажение прямолинейности раската между клетями №23 и №24);

- при прокате с натяжением (обороты клетки №24 увеличены от номинала на 3%) получено симметричное напряженное состояние как общего напряженного состояния, так и напряженного состояние по оси Z. При оценке напряженного состояние по оси Z наблюдаются силы, направленные на сжатие в центральной зоне, в то время как силы, направленные на растяжение, находятся на поверхности раската (полное отсутствие искажения прямолинейности раската между клетями №23 и №24).

Подробно анализируя сечения Б-Б, при прокате с подпором и свободной прокаткой, установлено, что на раскат действуют нормальные напряжения, такие как растяжение, сжатие, изгиб и кручение. В то время как на прокат с натяжением действуют напряжения, направленные на растяжения и сжатие. Таким образом, определены основные условия скручивания раската при прокате в РКБ - асимметричность напряженного состояния, вызванная силами, направленными на изгиб и кручение.

Конечным итогом проведенного исследования является разработанная технология производства высокоточного сортового проката номинальным диаметром 22 мм. Также полученные результаты исследования являются основой для проведения дальнейшего изучения межклетевой деформации на других профилях с последующим экспериментальным прокатом.

Выводы

Теоретический анализ с помощью методов математического моделирования позволяет изучать напряженно-деформированное состояние, температурные условия производства и структурировать производственные процессы и является неотъемлемой частью современного предприятия. Особую роль, на сегодняшний день, занимает математическое моделирование методом конечных элементов. МЭЖ является наиболее универсальным методом математического анализа задач ОМД. Результаты конечно-элементного анализа дают возможность получать зависимости, позволяющие управлять и совершенствовать производство, а также создавать новые технологические процессы.

Список литературы

1. Оборов М.В., Панковец И.А., Верещагин М.Н., Астапенко И.В. Численное моделирование процесса прокатки трубы D 88,9×8 на редуционно-растяжном стане трубопрокатного агрегата ТПА 21/168 ОАО «БМЗ - управляющая компания холдинга «БМК». «ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. Бюллетень научно-технической и экономической информации.» 2016;(3):82-86.

2. Панковец И.А. Разработка и внедрение автоматизированной системы оптимального раскрыя прутка на стане 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». «Литье и металлургия». 2019;(4):38-42.

3. Панковец И.А., Верещагин М.Н. Исследование влияния стресс-факторов на качество поверхности прутка при прокатке в черновой группе клетей. «СТАЛЬ». 2022; (8):14-23

4. Панковец И.А., Оборов М.В., Ходосовская Н.А., Верещагин М.Н. Совершенствование калибровки валков мелкосортно-проволочного стана 370/150 для обеспечения точности профиля проката. «ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. Бюллетень научно-технической и экономической информации». 2020;76(11):1119-1127.

ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА РЕЛЬСОВЫХ МАРОК СТАЛИ В ОАО «БМЗ - УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ ХОЛДИНГА «БМК»

Писаренко И.О., Пивцаев И.В., Путеев В.С., Шатило В.А.

ОАО «БМЗ - управляющая компания холдингом «БМК», г. Жлобин

Аннотация. Производство рельсовых марок стали подразумевает получение чистого высокотехнологичного продукта, как по вредным примесям химического состава — серы, фосфора и других элементов, так и по содержанию и размеру неметаллических включений. Технология включает в себя подготовку и пропорциональный ввод шихтовых и легирующих материалов на определенных стадиях производства. Так, при выплавке стали в ДСП применяется «чистая» шихта и углеродистый лом в процентном соотношении 65/35. В свою очередь, с целью недопущения образования эндогенных корундовых включений, при внепечной обработке применяются кордовые углеродсодержащие и шлакообразующие материалы. С целью исключения наличия экзогенных многосоставных неметаллических включений при разливке стали применяется периклазоуглеродистая металлопроводка. В настоящий момент в ОАО «БМЗ - управляющая компания холдинга «БМК» (далее – предприятие) разработана и внедрена опытная технология производства непрерывнолитой заготовки (блюм) прямоугольного сечения 300×400 мм (далее НЛЗ) рельсовых марок стали. Первая опытная плавка обеспечила более 80 % выхода годного для аттестации рельс специального назначения и порядка 20 % выхода годного для аттестации рельс общего назначения. В период с января по август 2023 года на предприятии произведено и отгружено в адрес потребителя более 27