

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ

И. А. Панковец

ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»
(г. Жлобин, Беларусь)

Рассмотрены актуальные технологические проблемы и способы их решения, связанные с производством круглого сортового проката в прутках на действующем стане 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». Проведено численное моделирование процесса прокатки, максимально приближенное к реальным условиям в черновых и чистовых клетях. Математически описан процесс раскря сортового проката в прутках на охлаждающем конвейере. Адекватность и пригодность разработанных моделей подтверждены результатами дальнейшего исследования, связанными с решением ряда практических задач: разработан алгоритм системы определения оптимального раскря сортового проката, позволяющий значительно снизить затраты на производство одной условной тонны продукции; разработаны технологические решения, препятствующие образованию дефектов поверхности прокатного происхождения в черновой группе клетей путем контроля объема подаваемой охлаждающей жидкости на валки; предложена 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 прокат.

Одним из способов достижения высокой производительности при сохранении качества продукции является математическое моделирование процесса прокатки с последующим 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 (МКЭ) [1]. В ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» накоплен опыт применения как сторонних программ математического моделирования для анализа пластического формоизменения стальных изделий в прокатном производстве, так и собственных математических моделей в производстве.

Разработка и внедрение металлосберегающих технологий в прокатном производстве. В основе работы лежат разработка и внедрение металлосберегающих технологий в прокатном производстве, позволяющих значительно сократить количество несоответствующей продукции. При этом проведено математическое моделирование процесса раскря сортового проката в прутках без использования МКЭ. Положительный результат работы достигнут благодаря исследованию, учету и математическому описанию всех факторов, влияющих на расход металла при производстве одной условной тонны продукции. Основной принцип

раскря сортового проката базируется на фундаментальном законе о сохранении массы. В свою очередь, баланс металла, расходуемого для получения одной заготовки, можно описать как массу металла, заданного в производство с учетом массы потерь металла при производстве, и массы готового продукта. Для анализа процесса раскря сортового проката разработана математическая модель расчета массы исходной заготовки

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

где $L_{\text{рас}}$ – длина штанги на холодильнике, мм; $D_{\text{гот}}$ – номинальный диаметр готового сорта, мм; ρ – плотность стали, 0,0000078 кг/мм³; $n_{\text{угар}}$ – угар в нагревательной печи, кг; $D_{\text{нож1}}$ – 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 обрезки при резке на ножах № 1, мм³; $V_{\text{нож2}}$ – объем обрезки при резке на ножах № 2, мм³; $V_{\text{нож3}}$ – объем обрезки при резке на ножах № 3, мм³; $V_{\text{пил}}$ – объем потерь металла при обрезке дефектных концевых участков и при резке на мерные длины, обусловленных шириной реза, мм³.

На основе уравнения баланса металла оценивается возможность прогнозирования и управления длиной порезки раската на мерные прутки. Для оперативного раскря сортового проката на мерные прутки, а так-

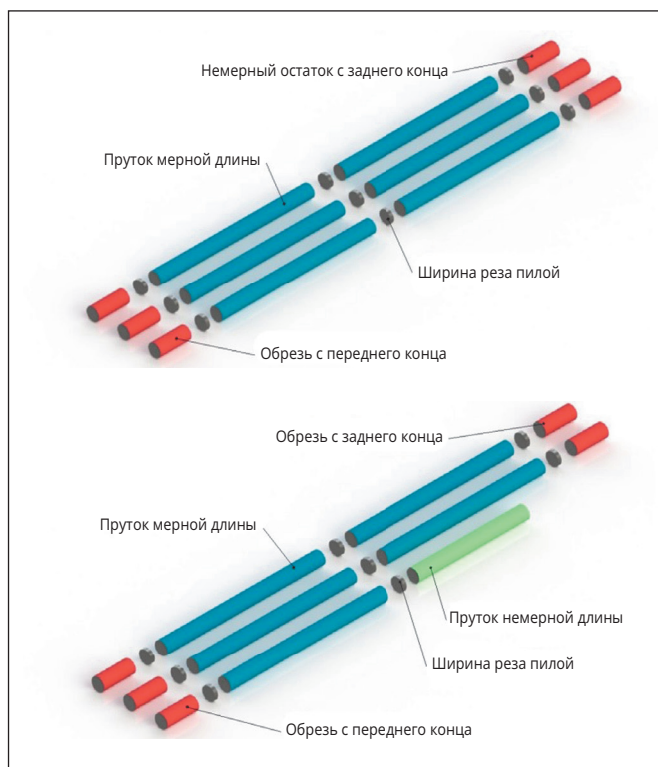


Рис. 1. Раскрой раската на равные части и с немерной длиной

же для расчета массы заготовки разработана математическая модель, включающая 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 на основе принципа прокатки с короткой (либо более длинной) 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 %.

Разработка и внедрение технологических решений, препятствующих образованию дефектов поверхности прокатного происхождения. Для разработки мероприятий, направленных на улучшение качества поверхности, необходимы правильная классификация дефектов и определение условий их образования. Проведенные металлографические исследования позволили установить, что дефекты, выявляемые 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 углу исходной заготовки. В ходе металлографического контроля сделано предположение, что 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 (рис. 2).

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

- радиус скругления (сопряжения) граней бьюма;
- коэффициент трения при прокатке (имитация износа калибра);

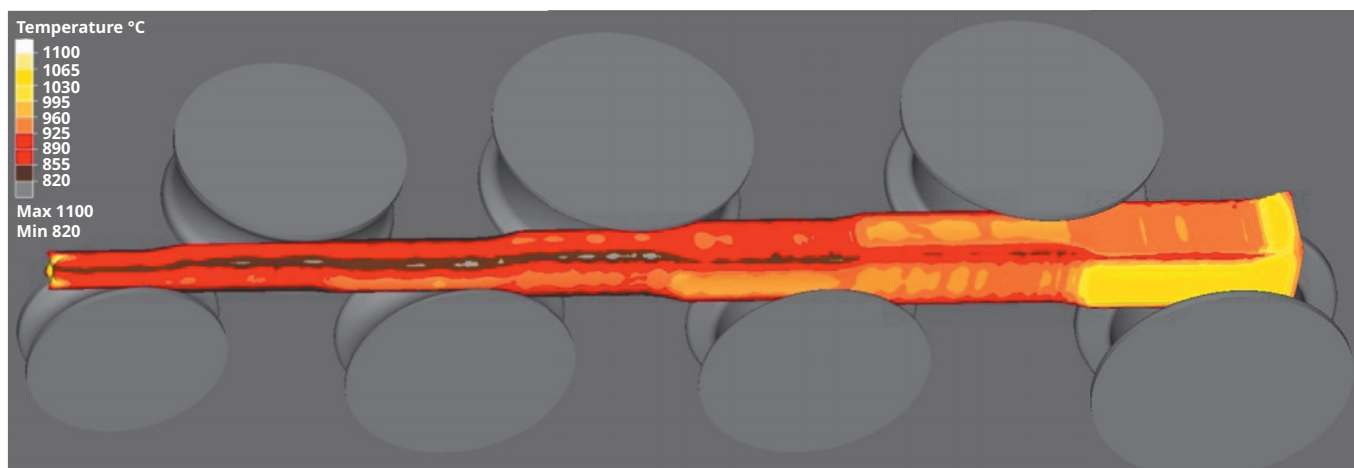


Рис. 2. Математическая модель прокатки в черновой группе клетей

Таблица 1. Результаты моделирования процесса прокатки в первой клетке

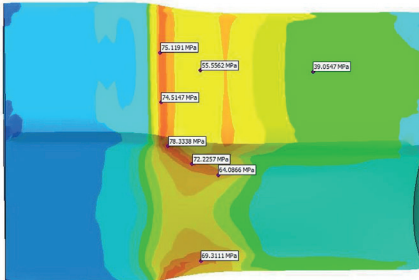
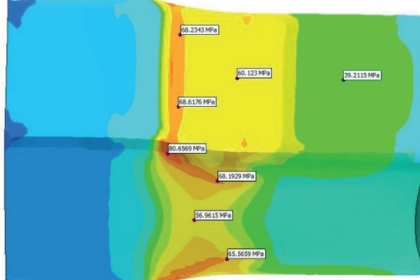
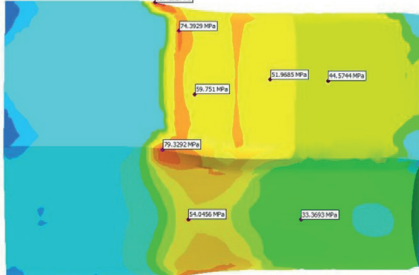
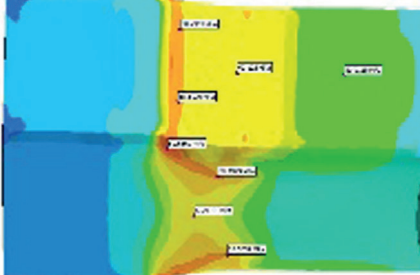
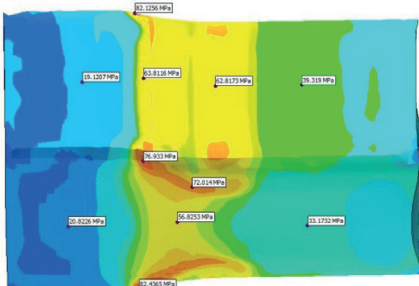
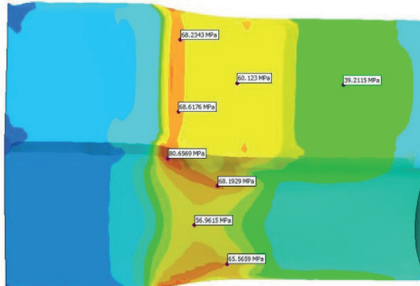
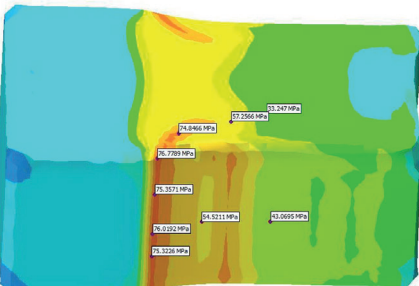
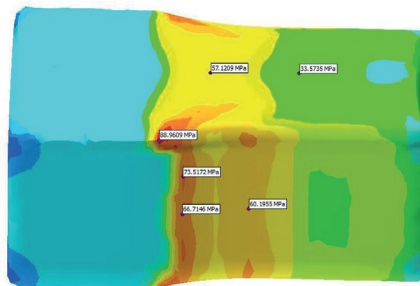
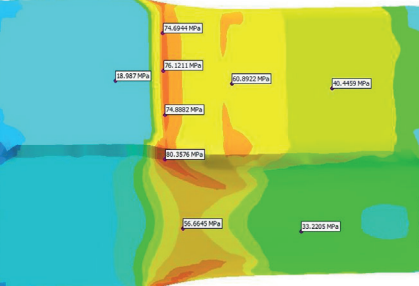
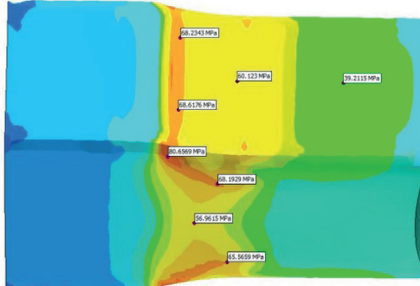
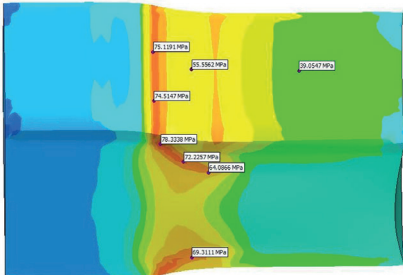
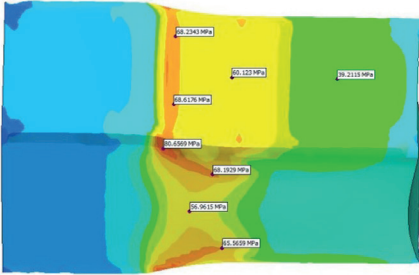
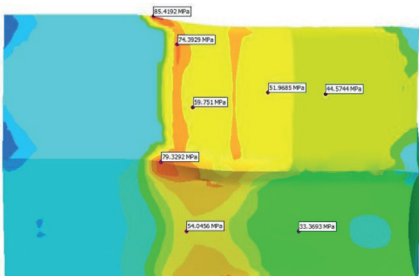
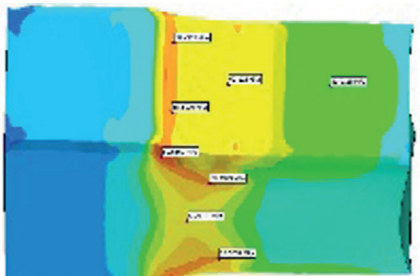
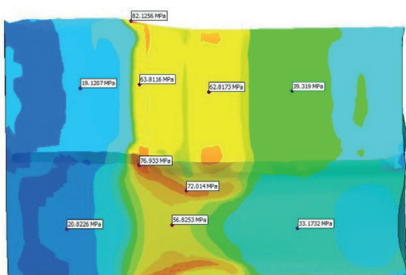
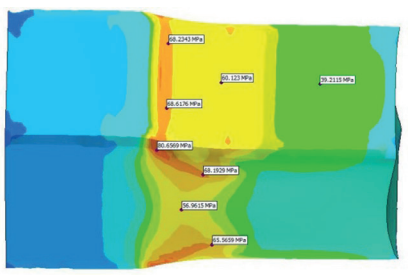

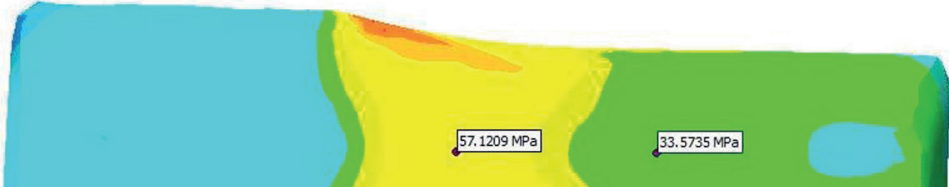

Модель	Визуализация температурно-деформационных параметров прокатки	
<p>Скругления 20 и 10 мм на исходной заготовке Выходные данные: σ_{\max} – 78 МПа при скруглении 20 мм; σ_{\max} – 81 МПа при скруглении 10 мм</p>	 <p>1</p>	 <p>2</p>
<p>Скругления 0 и 10 мм на исходной заготовке Выходные данные: σ_{\max} – 85 МПа при скруглении 0 мм; σ_{\max} – 81 МПа при скруглении 10 мм</p>	 <p>3</p>	 <p>4</p>
<p>Различные коэффициенты трения $K - 1,0 / K - 0,4$ Выходные данные: σ_{\max} – 83 МПа при коэф. трения 1; σ_{\max} – 81 МПа при коэф. трения 0,4</p>	 <p>5</p>	 <p>6</p>
<p>Различные радиусы сопряжения калибров $-R10 / +R10$ Выходные данные: σ_{\max} – 77 МПа радиус –10 мм; σ_{\max} – 89 МПа радиус +10 мм</p>	 <p>7</p>	 <p>8</p>
<p>Температура прокатного инструмента $20\text{ }^{\circ}\text{C} / 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ Выходные данные: σ_{\max} – 81 МПа при температуре 150 °С; σ_{\max} – 81 МПа при температуре 20 °С</p>	 <p>9</p>	 <p>10</p>

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 прокатке 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 прокатке 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>		

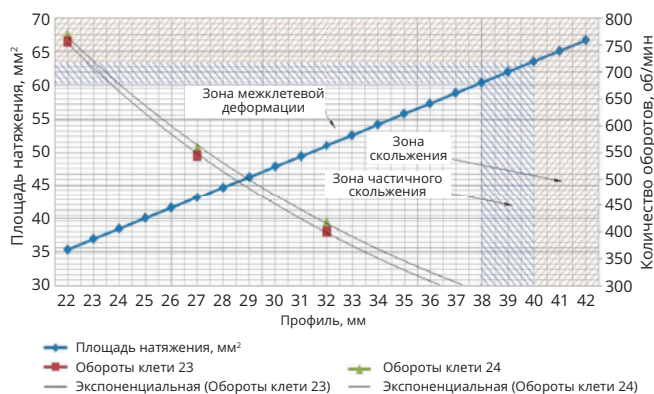


Рис. 3. Зависимость геометрических размеров от частоты вращения чистой клетки № 24 при производстве сортового проката

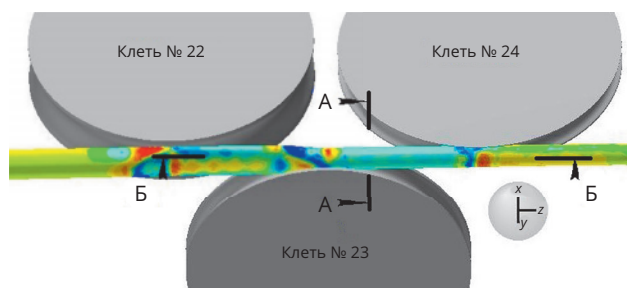


Рис. 4. Схема выбора сечения напряженного состояния проката номинальным диаметром 22 мм

радиус скругления (сопряжения) стенки с дном ящичного калибра;

температура поверхности прокатного инструмента.

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 прокатки при радиусе скругления граней заготовки 10 мм;

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

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

при моделировании прокатки заготовок с износом и выработкой поверхности отмечено увеличение напряжения в очаге деформации на 10 %; причина связана с повышением шероховатости и отсутствием граничного трения между прокатываемым материалом и поверхностью вала;

моделирование процесса прокатки с температурой поверхности валков $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (имитация прокатки с интенсивным охлаждением валков) выявило локальное повышение напряженного состояния и значительное снижение температуры поверхности раската, снижающее пластичность металла [3].

Итогом проделанной работы стало внесение изменений и дополнений в технологическую инструкцию,

что позволило одновременно снизить дефектность производимой продукции с 2029 ppm до 56 ppm.

Исследования в области производства сортового проката с высокоточной геометрией поперечного профиля. На основе результатов математического моделирования МКЭ 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 измененными технологическими параметрами. Систематизация и анализ полученных данных выявили зависимость изменения геометрических размеров профиля от частоты вращения валков чистой клетки. Меняя частоту вращения чистой клетки относительно предчистой, создали межклетьевое натяжение раската, влияющее на геометрические размеры конечного изделия. Таким образом, сделан предварительный вывод — высокоточные геометрические размеры проката возможно получить при натяжении раската в межклетьевом пространстве между чистой и предчистой клетями [4].

Получив результаты геометрии поперечного профиля при моделировании процесса прокатки номинальным диаметром 22 мм с различными оборотами валков клетки № 24 (рис. 4), оценили напряженное состояние, результаты которого представлены в табл. 2.

Анализируя напряженное состояние в сечениях А-А и Б-Б согласно рис. 5 и табл. 2, выявили следующее:

при прокатке с подпором (обороты клетки № 24 снижены от номинала на 3 %) наблюдается асимметричность напряженного состояния порядка 100 МПа как общего напряженного состояния, так и напряженного состояния 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 состояния по оси Z наблюдаются силы, направленные только на сжатие (незначительное искажение прямолинейности раската между клетями № 23 и № 24);

при прокатке с натяжением (обороты клетки № 24 увеличены от номинала на 3 %) получено симметричное напряженное состояние как общего напряженного состояния, так и напряженного состояния по оси Z.

При оценке напряженного состояния 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).

При анализе сечения Б-Б при прокатке с подпором и свободной прокаткой установлено, что на раскат действуют нормальные напряжения, такие как растяжение, сжатие, изгиб и кручение, тогда как на прокат с натяжением действуют напряжения, направленные на растяжение и сжатие. Таким образом, определены основные условия скручивания раската при прокатке в РКБ – асимметричность напряженного состояния, вызванная силами, направленными на изгиб и кручение.

Итогом проведенного исследования стала разработанная технология производства высокоточного сортового проката номинальным диаметром 22 мм. Полученные результаты исследования положены в основу проведения дальнейшего изучения межклетевой деформации на других профилях с последующей экспериментальной прокаткой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретический анализ с помощью методов математического моделирования позволяет изучать напряженно-деформированное состояние, температурные условия производства, структурировать производственные процессы и является неотъемлемой частью современного предприятия. Особую роль занимает математическое моделирование методом конечных

элементов. МКЭ 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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 : Бюл. НТИЭИ. 2016. № 3. С. 82 – 86.
2. **Панковец И.А.** Разработка и внедрение автоматизированной системы оптимального раскроя прутка на стане 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» // Литье и металлургия. 2019. № 4. С. 38 – 42.
3. **Панковец И.А., Возная В.И., Веденев А.В., Верещагин М.Н.** Исследование условий образования поверхностных дефектов при прокатке прутка на мелкосортно-проволочном стане и методы их устранения // Черная металлургия : Бюл. НТИЭИ. 2021. № 77 (10). С. 1053 – 1059.
4. **Pankovets I.A., Vereshchagin M.N.** Studying the Influence of Stress Factors on the Bar Surface Quality during Rolling in Roughing Train // Steel in Translation. 2002. Vol. 52. No. 8. P. 773 – 782.
5. **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 : Бюл. НТИЭИ. 2020. № 76 (11). С. 1119 – 1127.

Статья поступила 30.10.2023