



УДК 669

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ НА МЕЛКОСОРТНОМ СТАНЕ

*И. А. ПАНКОВЕЦ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: par.espc@bmz.gomel.by.*

*Проведена оценка актуальных технологических задач при производстве сортового проката в прутках на мелкосортном стане: улучшение качества поверхности сортового проката; снижение расхода металла при производстве одной тонны металлопродукции; повышение точности геометрических размеров поперечного круглого профиля. Разработана численная модель прокатки, отражающая реальные условия процесса. На основе математического моделирования получены достоверные результаты для дальнейшего снижения затрат на производство одной тонны металлопродукции, совершенствования качества поверхности сортового проката и разработки новой технологии производства сортового проката. В результате проведенной работы разработаны: алгоритм системы определения оптимального раскрытия сортового проката; технологические решения, препятствующие образованию дефектов поверхности прокатного происхождения; перспективная схема калибровки, позволяющая получать высокоточную геометрию поперечного профиля с контролируемым межклетьевым натяжением.*

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

## MATHEMATICAL MODELING OF ROLLING PROCESSES ON A SMALL-SECTION MILL

*I.A. PANKOVETS, OJSC “BSW – Management Company of Holding “BMC”, Zhlobin, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennaya str. E-mail: par.espc@bmz.gomel.by.*

*The assessment of the current technological tasks in the production of bar section rolled products on a small-section mill is carried out: improving the quality of the surface of the bar section rolled products; reducing the metal consumption per ton of metal products; improving the accuracy of the geometric dimensions of the round cross-section profile. A numerical model of rolling has been developed that reflects the real conditions of the process. Based on the obtained results of mathematical modeling, reliable results have been obtained for further reducing the cost of producing one ton of metal products, improving the quality of the surface of the bar section rolled products and developing a new technology for the production of bar section rolled products. The results of solving a number of topical problems are presented: an algorithm for the system for determining the optimal cutting of bar section rolled products has been developed; technological solutions have been developed to prevent the formation of surface defects of rolling origin; an advanced calibration scheme has been developed that allows obtaining high-precision geometry of the cross-section profile with controlled inter-stand tension.*

**Keywords.** *Rolling mill, mathematical modeling, hot rolling, technology improvement, roll profile calibration, surface quality, inter-stand tension, high-precision geometry of bar section rolled products.*

### Введение

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 этапах, 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. Это наиболее перспективный метод определения специфических условий, энергосиловых и физико-механических показателей технологического процесса. При его использовании создается имитация реального процесса, который позволяет оценить распределение нагрузок на прокатные клети. Моделирование процесса прокатки осуществляется с помощью метода конечных элементов (МКЭ) – современного инструмента, позволяющего совершенствовать технологические процессы [1].

### 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 раскроя сортового проката в прутках без использования МКЭ. Положительный результат в работе достигнут благодаря исследованию, учету и математическому описанию всех факторов, влияющих на расход металла при производстве одной условной тонны продукции. Основным принципом по раскрою сортового проката базируется на фундаментальном законе о сохранении массы. В свою очередь баланс металла на одной заготовке можно описать так: масса металла, заданного в производство, равна сумме массы потерь металла при производстве и массе готового продукта. Исследуя и анализируя процесс раскроя сортового проката, разработали математическую модель расчета массы исходной заготовки:

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

где  $L_{\text{рас}}$  – длина штанги на холодильнике, мм;  $D_{\text{гот}}$  – номинальный диаметр готового сорта, мм;  $\pi$  – математическая константа, 3,14;  $\rho$  – плотность стали, 0,0000078 кг/мм<sup>3</sup>;  $n_{\text{угар}}$  – величина угара в нагревательной печи;  $D_{\text{нож1}}$ ,  $D_{\text{нож2}}$ ,  $D_{\text{нож3}}$  – диаметр раската при резке на ножах № 1, 2, 3 соответственно, мм;  $V_{\text{нож1}}$ ,  $V_{\text{нож2}}$ ,  $V_{\text{нож3}}$  – объем обрезки при резке на ножах № 1, 2, 3 соответственно, мм<sup>3</sup>;  $V_{\text{пилл}}$  – объем потерь металла при обрезке дефектных концевых участков и при резке на мерные длины, обусловленные шириной реза, мм<sup>3</sup> [2].

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

Для оперативного раскроя сортового проката на мерные прутки, а также 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) (рис. 1);

вариант 2 – расчет основан на принципе проката 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%.

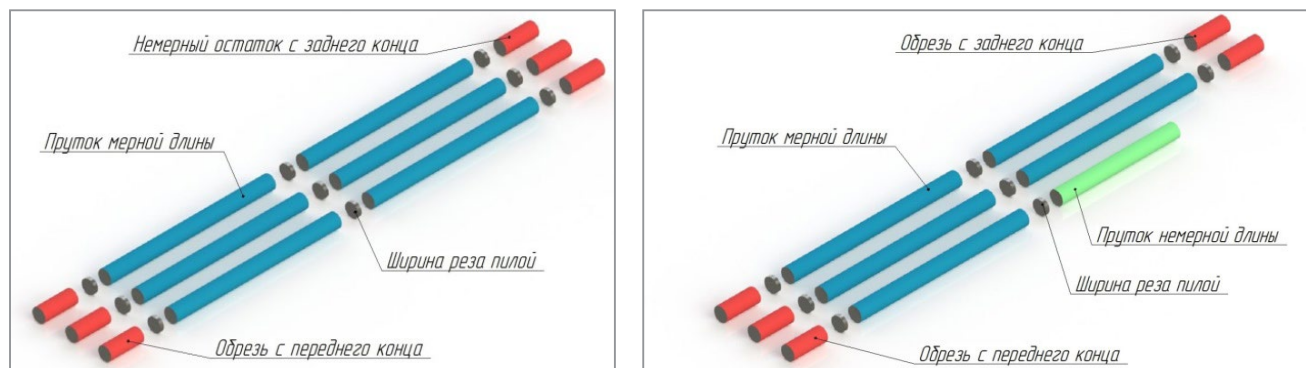


Рис. 1. Раскрой раската на равные части и с немерной длиной

**Разработка и внедрение технологических решений, препятствующих образованию дефектов поверхности прокатного происхождения**

Для разработки мероприятий, направленных на улучшение качества поверхности, необходимы 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 (рис. 2).

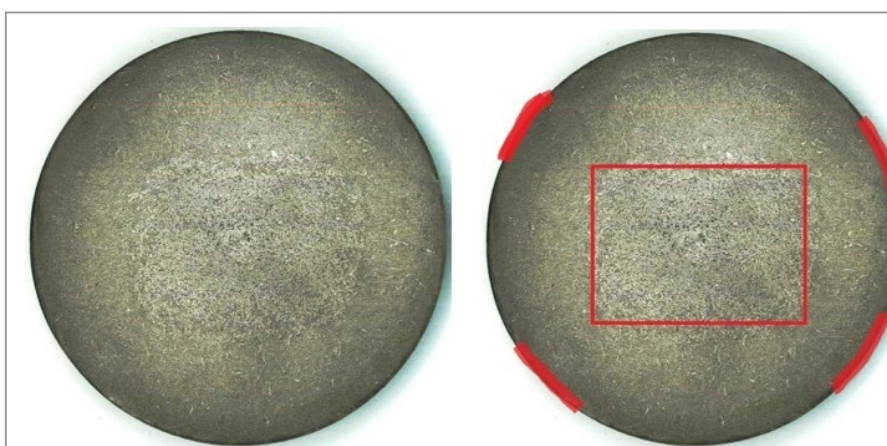


Рис. 2. Расположение поверхностных дефектов на макротемплете металлопроката

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 (рис. 3).

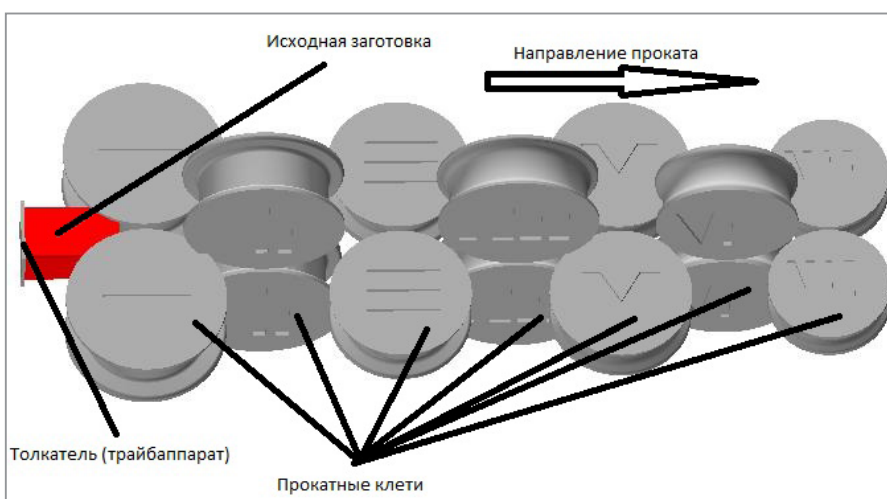
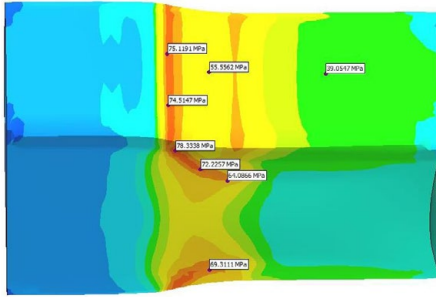
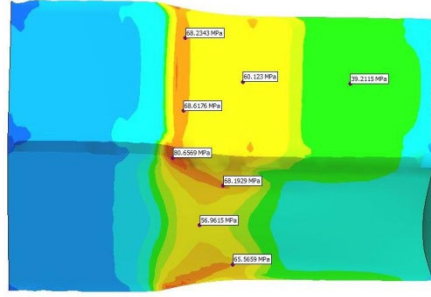
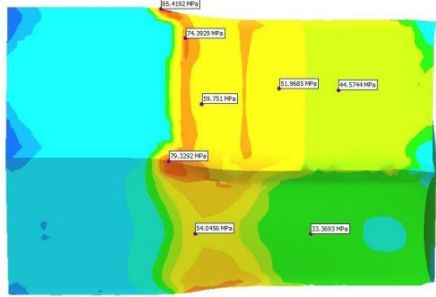
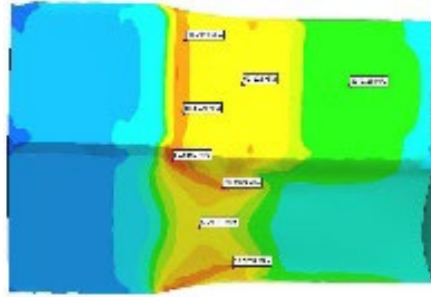
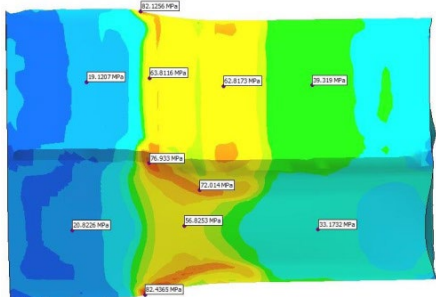
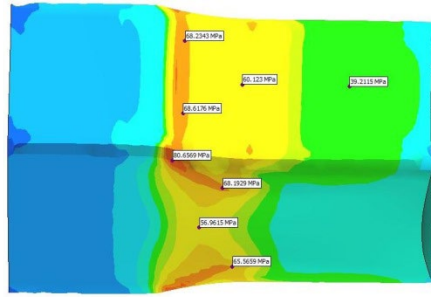
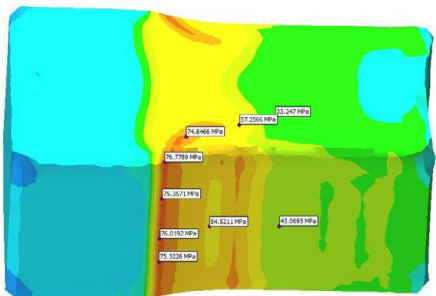
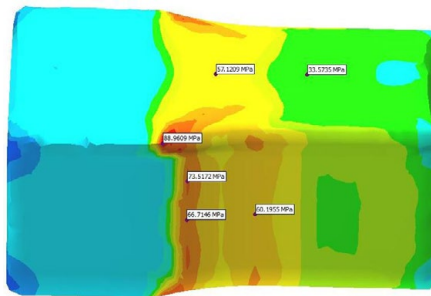
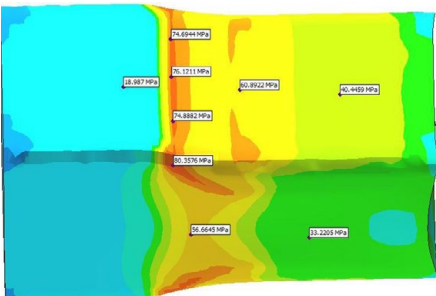
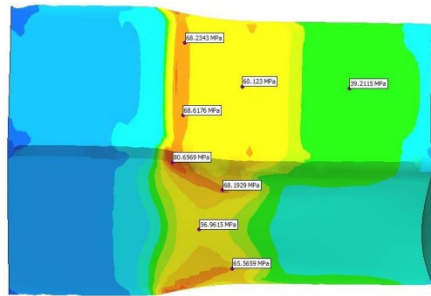


Рис. 3. Математическая модель проката черновой группы клетей

В ходе исследования рассмотрено влияние на снижение пластичности следующих факторов: радиуса скругления (сопряжения) граней бьюма; коэффициента трения при прокатке (имитация износа калибра); радиуса скругления (сопряжения) стенки с дном ящичного калибра; температуры поверхности прокатного инструмента (табл. 1).

Таблица 1. Результаты моделирования процесса прокатки в первой клетке

| Модель                                                                                                                                                             | Визуализация температурно-деформационных параметров прокатки                        |                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Скругление 20 и 10 мм на исходной заготовке<br>Выходные данные:<br>$\sigma_{\max} = 78$ МПа при скруглении 20 мм;<br>$\sigma_{\max} = 81$ МПа при скруглении 10 мм |    |    |
| Скругление 0 и 10 мм на исходной заготовке<br>Выходные данные:<br>$\sigma_{\max} = 85$ МПа при скруглении 0 мм;<br>$\sigma_{\max} = 81$ МПа при скруглении 10 мм   |    |    |
| Коэффициент трения $K=1,0$ , $K=0,4$<br>Выходные данные:<br>$\sigma_{\max} = 83$ МПа при $K = 1,0$ ;<br>$\sigma_{\max} = 81$ МПа при $K = 0,4$                     |   |   |
| Радиус сопряжения калибров $R=-10$ мм, $R=+10$ мм<br>Выходные данные:<br>$\sigma_{\max} = 77$ МПа, $R=-10$ мм;<br>$\sigma_{\max} = 89$ МПа, $R=+10$ мм             |  |  |
| Температура прокатного инструмента $T=20$ °C, $T=150$ °C<br>Выходные данные:<br>$\sigma_{\max} = 81$ МПа при $T=150$ °C;<br>$\sigma_{\max} = 81$ МПа при $T=20$ °C |  |  |

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 повышается 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 валка;
- моделирование процесса проката с температурой поверхности валков  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (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 одновременно снизить дефектность производимой продукции с 2029 до 56 ppm.

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

Оценив все преимущества математического моделирования МКЭ, разработали новую концептуальную технологию, позволяющую 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 выявили зависимость изменения геометрических размеров профиля от частоты вращения валков чистовой клетки. При изменении частоты вращения чистовой клетки относительно предчистовой создается межклетьеовое натяжение раската, влияющее на геометрические размеры конечного изделия (рис. 4). Таким образом, сделан предварительный вывод – высокоточные геометрические размеры проката можно получить при натяжении раската в межклетьеовом пространстве между чистовой и предчистовой клетями [4].

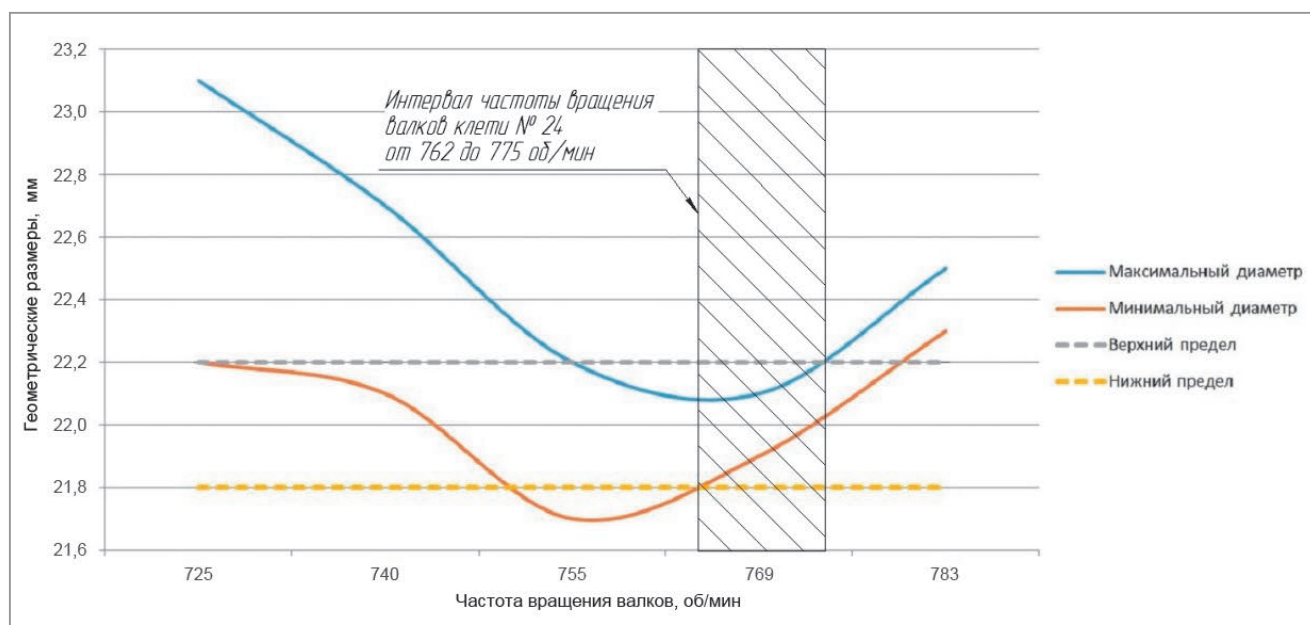


Рис. 4. Зависимость геометрических размеров от частоты вращения чистовой клетки № 24 при производстве сортового проката номинальным диаметром 22 мм

В процессе исследования получены результаты геометрии поперечного профиля при моделировании процесса прокатки номинальным диаметром 22 мм с различными оборотами валков клетки № 24 и проведена оценка напряженного состояния согласно рис. 5. Результаты приведены в табл. 2.

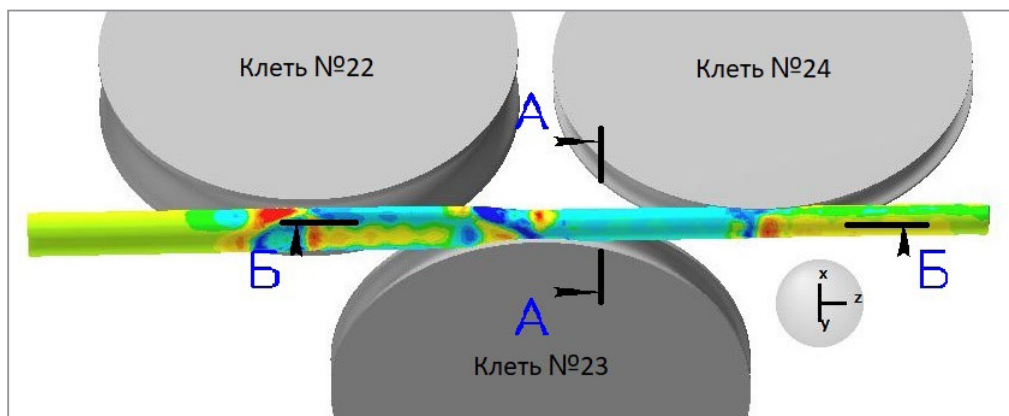
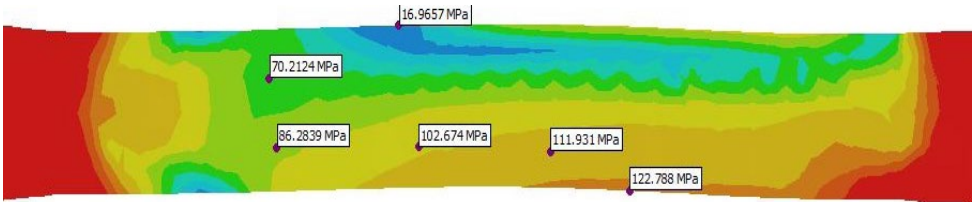
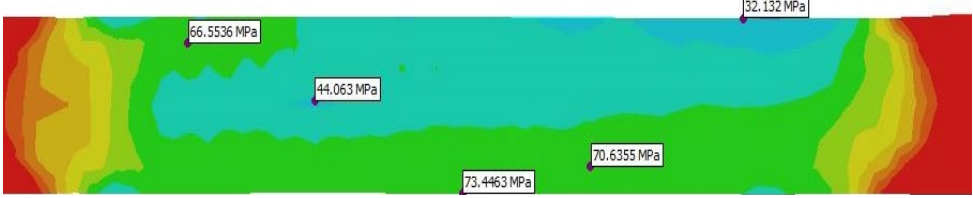
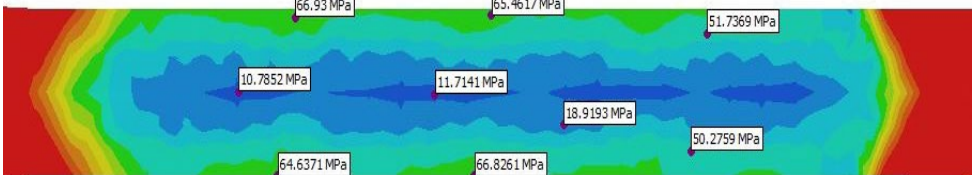


Рис. 5. Схема выбора сечения напряженного состояния проката номинальным диаметром 22 мм (сечение А–А поперечное, сечение Б–Б продольное)

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>  |                                                                                         |  |

| Модель                                                                                             | Визуализация напряженного состояния в межклетьевом пространстве между клетями № 23 и 24 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Общее напряженное состояние.<br>Сечение Б–Б.<br>При прокате с подпором<br>(–3% об/мин клетки № 24) |       |
| Общее напряженное состояние.<br>Сечение Б–Б.<br>Свободная прокатка<br>(+0% об/мин клетки № 24)     |       |
| Общее напряженное состояние.<br>Сечение Б–Б.<br>Прокатка с натяжением<br>(+3% об/мин клетки № 24)  |       |

Анализируя напряженное состояние в сечениях А–А и Б–Б (рис. 5, табл. 2), выявили 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 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 действуют 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 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).

Подробно анализируя сечения Б–Б при прокате с подпором и свободной прокаткой, удалось установить, 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 могут служить основой для 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. Особую роль на сегодняшний день занимает математическое моделирование методом конечных элементов. МЭК является наиболее универсальным методом математического анализа задач ОМД. Результаты конечно-элементного анализа дают возможность получать зависимости, позволяющие управлять производством и совершенствовать его, а также создавать новые технологические процессы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Численное моделирование процесса прокатки трубы D 88,9×8 на редуционно-растяжном стане трубопрокатного агрегата ТПА 21/168 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / М. В. Оборов [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 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» / И. А. Панковец // Литье и металлургия. – 2019. – № 4. – С. 38–42.
3. **Панковец, И. А.** Исследование влияния стресс-факторов на качество поверхности прутка при прокатке в черновой группе клетей / И. А. Панковец, М. Н. Верещагин // Сталь. – 2022. – № 8. – С. 14–23.
4. Совершенствование калибровки валков мелкосортно-проволочного стана 370/150 для обеспечения точности профиля проката / И. А. Панковец [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – № 11. – С. 1119–1127.

## REFERENCES

1. **Oborov M. V., Pankovets I. A., Vereshchagin M. N., Astapenko I. V.** Chislennoe modelirovanie processa prokatki truby D 88,9×8 na redukcionno-rastyazhnom stane truboprokatnogo agregata TPA 21/168 ОАО «BMZ – upravlyayushchaya kompaniya holdinga «BMK» [Numerical modeling of the rolling process of pipe D 88.9×8 on the reduction-stretching mill of the TPA 21/168 pipe rolling unit of OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoj i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2016, no. 3, pp. 82–86.
2. **Pankovets I. A.** Razrabotka i vnedrenie avtomatizirovannoj sistemy optimal'nogo raskroya prutka na stane 370/150 ОАО «BMZ – upravlyayushchaya kompaniya holdinga «BMK» [Development and implementation of an automated system of optimal bar cutting at the mill 370/150 at OJSC “BSW – Management Company of the Holding “BMC”]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 4, pp. 38–42.
3. **Pankovets I. A., Vereshchagin M. N.** Issledovanie vliyaniya stress-faktorov na kachestvo poverhnosti prutka pri prokatke v chernovoj gruppe kletej [Study of the influence of stress factors on the quality of the surface of a rod during rolling in a roughing group of stands]. *Stal' = Steel*, 2022, no. 8, pp. 14–23.
4. **Pankovets I. A., Oborov M. V., Khodosovskaya N. A., Vereshchagin M. N.** Sovershenstvovanie kalibrovki valkov melkosortno-provolochnogo stana 370/150 dlya obespecheniya tochnosti profilya prokata [Improving the calibration of rolls of the small-section wire mill 370/150 to ensure the accuracy of the rolled product profile]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoj i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, no. 11, pp. 1119–1127.