

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРЕСС-ФАКТОРОВ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРУТКА ПРИ ПРОКАТКЕ В ЧЕРНОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ

И. А. Панковец¹, М. Н. Верещагин²

¹ ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»
(г. Жлобин, Республика Беларусь),

² Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого
(г. Гомель, Республика Беларусь)

Исследован механизм образования дефектов поверхности прокатного происхождения на горячекатаном прутке в условиях мелкосортно-проволочного стана 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК». Проведено численное моделирование параметров прокатки в черновой группе клетей. Определено потенциальное влияние радиуса скругления (сопряжения) граней исходной заготовки номинальным сечением 250×300 мм, коэффициента трения, радиуса сопряжения стенки и дна калибра, температуры поверхности прокатного инструмента на температурно-деформационные характеристики проката и конечное качество поверхности сортового проката в прутках. В результате эксперимента выявлены закономерности, повышающие риск образования поверхностных дефектов в готовом прутке.

Ключевые слова: горячая прокатка, прокатный стан, численная модель, качество поверхности, радиус сопряжения, коэффициент трения, температура валков, охлаждение валков.

За весь период работы стана 370/150 (начиная с октября 2015 г.) при производстве сортового проката в прутках отмечаются дефекты поверхности прокатного происхождения, такие как морщины, вкатанная окалина, деформационная рванина, чешуйчатость. Классификация дефектов проводилась соответствии с ГОСТ 21014. В ходе анализа причин образования поверхностных дефектов выявлена вероятная причина – снижение пластичности металла на поверхности тела раската. Для исследования и определения стресс-факторов, потенциально способных привести к снижению пластичности, проведены эксперименты методом конечных элементов (МКЭ). МКЭ – это метод приближенного численного решения физических задач.

Численное моделирование процесса прокатки – наиболее перспективный метод определения энергосиловых и физико-механических показателей технологического процесса. При использовании численного моделирования создается имитация реального процесса, которая позволяет оценить распределение нагрузок на прокатные клетки. Преимущество данного метода заключается в возможности проведения комплексного физико-механического анализа, который основывается на концептуальных положениях, законах и теоремах механики сплошной среды и деформируемого тела.

Для подтверждения этого было проведено математическое моделирование процесса деформации слитка в прокатных валках. При построении численной модели прокатки в черновой группе клетей для получения круга диаметром 80 мм из непрерывнолитой заготовки (далее блюма) сечением 250×300 мм был применен МКЭ [1].

Методика проведения исследования. В качестве основополагающих факторов снижения пластичности

металла на поверхности при прокатке блюма номинальным сечением 250×300 мм и длиной от 2900 до 5900 мм, определены следующие:

влияние радиуса скругления (сопряжения) граней блюма;

влияние коэффициента трения при прокатке (имитация износа калибра);

влияние радиуса скругления (сопряжения) стенки с дном ящичного калибра;

влияние температуры поверхности прокатного инструмента.

В качестве объекта исследования выбраны клетки черновой группы (рис. 1).

Исследование влияния радиуса скругления (сопряжения) граней блюма номинальным сечением 250×300 мм на температурно-деформационные характеристики процесса прокатки (рис. 2).

По данным табл. 1 видно, что при температуре начала прокатки 1100 °С и температуре поверхности валков 150 °С максимальное напряжение деформации в углах блюма с радиусами скругления 20 и 10 мм со-

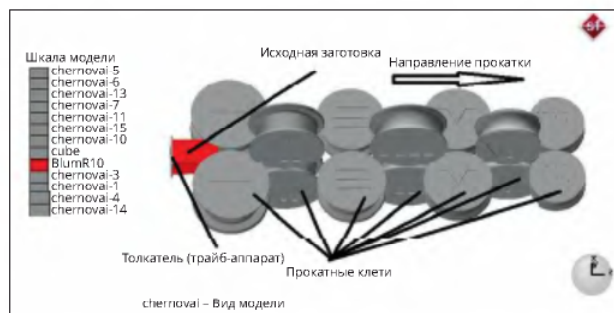



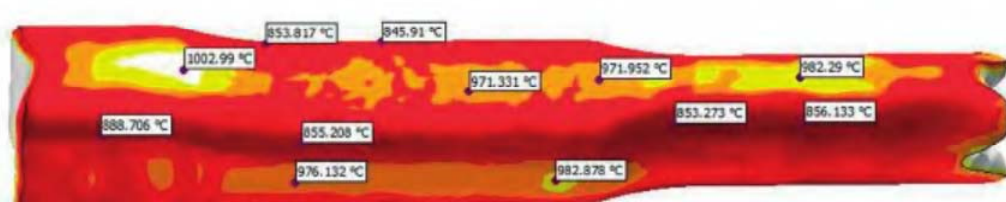
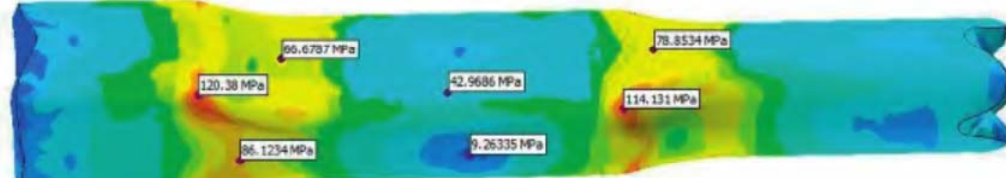
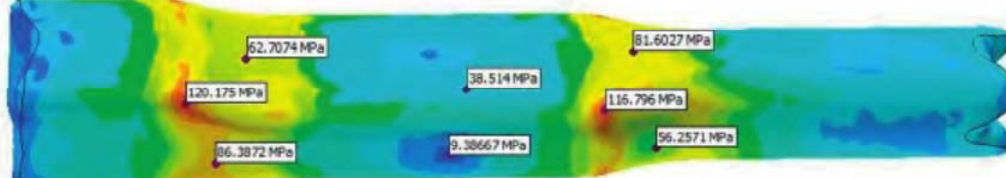


Рис. 1. Математическая модель прокатки в черновой группе клетей

Таблица 1. Результаты моделирования процесса прокатки с радиусом скругления 20 и 10 мм на блюме

Модель	Визуализация температурно-деформационных параметров прокатки	
<p>R20/R10 Клеть 1</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 78$ МПа при скруглении 20 мм; $\sigma_{\max} = 81$ МПа при скруглении 10 мм</p>		
<p>R20/R10 Клеть 1</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 952$ °C при скруглении 20 мм; $T_{\min} = 951$ °C при скруглении 10 мм</p>		
<p>R10 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 848$ °C $T_{\max} = 1119$ °C</p>		
<p>R20 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 846$ °C $T_{\max} = 1118$ °C</p>		
<p>R10 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 120$ МПа</p>		
<p>R20 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 120$ МПа</p>		

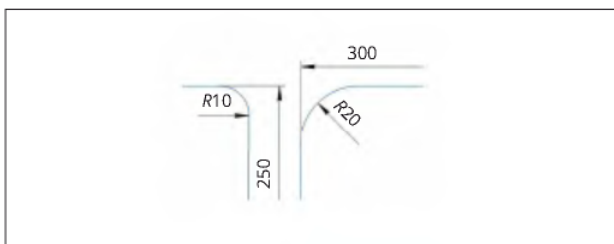


Рис. 2. Сопряжение граней бруса



Рис. 3. Валки черновой группы клетей с сеткой разгара на поверхности бруса при различных коэффициентах трения

ставило 78 и 81 МПа, соответственно. При этом минимальная температура в очаге деформации первой клетки в обоих случаях составила 951-952 °С.

Анализируя далее результаты математического моделирования, различия температурно-деформационного состояния не наблюдали. Причина отсутствия заметных различий температурно-деформационного состояния в очагах деформации клетей 2-7 между радиусом скругления 10 и 20 мм не выявлена. Данный факт можно объяснить тем, что при прокатке в пер-

вой клетки блюмов с разными радиусами скругления плоскостей раската принимает форму первого калибра, далее раскат в обоих случаях имеет одинаковую геометрию поперечного профиля, что и сказалось на отсутствии заметных различий при прокатке. Стоит отметить, что при прокатке бруса с радиусом скругления граней 20 мм увеличилось усилие толкателя (трайб-аппарата) в очаг деформации первой клетки на 6 %, однако распределение нагрузки более равномерное при меньшем напряжении в углах бруса.

В ходе проведения эксперимента с радиусами скругления в углах бруса 20 и 10 мм получены однозначные данные, свидетельствующие о том, что заметных различий при прокатке не выявлено. В связи с этим проведен дополнительный эксперимент с брусом без радиуса скругления плоскостей поверхности — моделирование процесса прокатки бруса после 100 %-ной обточки поверхности.

Результатом дополнительного эксперимента с углами бруса без скругления стало повышение максимального напряжения в первой клетке до 85 МПа, при этом минимальная температура составила 892 °С. Далее при прокатке в клетях 4-5 минимальная температура составила 769 °С, максимальная нагрузка составила 123 МПа (табл. 2). Таким образом, отсутствие скругления на бруске повышает температурный градиент и при этом возрастает локальное напряжение на поверхности раската при прокатке.

Исследование влияния коэффициента трения при прокатке. Принято считать, что в процессе горячей прокатки в момент захвата валком раската и непосредственно при самой прокатке происходит граничное трение, возникающее на поверхности раздела двух тел (валка и раската) [2, 3]. В качестве адсорбционной смазки может выступать мелкодисперсная окалина на поверхности раската, при этом увеличение общей шероховатости валка (выработка калибра) приводит к увеличению коэффициента трения вследствие более грубой поверхности калибра (рис. 3).

По данным табл. 3 видно, что при температуре начала прокатки 1100 °С и температуре поверхности валков 150 °С максимальное напряжение деформации в углах бруса с различными коэффициентами трения 1,0 и 0,4 составило 83 и 81 МПа, соответственно. При этом минимальная температура в очаге деформации первой клетки обоих случаев составила 966 и 951 °С.

Далее при анализе результатов математического моделирования на клетях 4-5 различия деформационного состояния проявились более значительно, при этом температурный градиент остался неизменным. Повышение напряженного состояния в очаге деформации объясняется высоким коэффициентом трения, обусловленным выработкой калибра. В процессе прокатки из-за выработки поверхности калибра отсутствует граничное трение. Отсутствие трения скольжения дополнительно препятствует раскату пластически деформироваться и принимать форму калибра, вследствие чего и возникает повышение локального напряжения на поверхности раската.

Таблица 2. Результаты моделирования процесса прокатки без радиуса скругления на блюме

Модель	Визуализация температурно-деформационных параметров прокатки	
<p>R0/R10 Клеть 1</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 85$ МПа при скруглении 0 мм; $\sigma_{\max} = 81$ МПа при скруглении 10 мм</p>		
<p>R0/R10 Клеть 1</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 892$ °C при скруглении 0 мм; $T_{\min} = 951$ °C при скруглении 10 мм</p>		
<p>R0 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 769$ °C $T_{\max} = 1118$ °C</p>		
<p>R10 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 848$ °C $T_{\max} = 1119$ °C</p>		
<p>R0 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 123$ МПа</p>		
<p>R10 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 120$ МПа</p>		

Таблица 3. Результаты моделирования процесса прокатки с различными коэффициентами трения

Модель	Визуализация температурно-деформационных параметров прокатки
<p>K-1,0/K-0,4 Клеть 1</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 83 \text{ МПа}$, при $K = 1$; $\sigma_{\max} = 81 \text{ МПа}$ при $K = 0,4$;</p>	
<p>K-1,0/K-0,4 Клеть 1</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 966 \text{ }^\circ\text{C}$ при $K = 1$; $T_{\min} = 951 \text{ }^\circ\text{C}$ при $K = 0,4$;</p>	
<p>K-0,4 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 848 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\max} = 1119 \text{ }^\circ\text{C}$</p>	
<p>K-1,0 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 851 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\max} = 1123 \text{ }^\circ\text{C}$</p>	
<p>K-0,4 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 120 \text{ МПа}$</p>	
<p>K-1,0 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 134 \text{ МПа}$</p>	

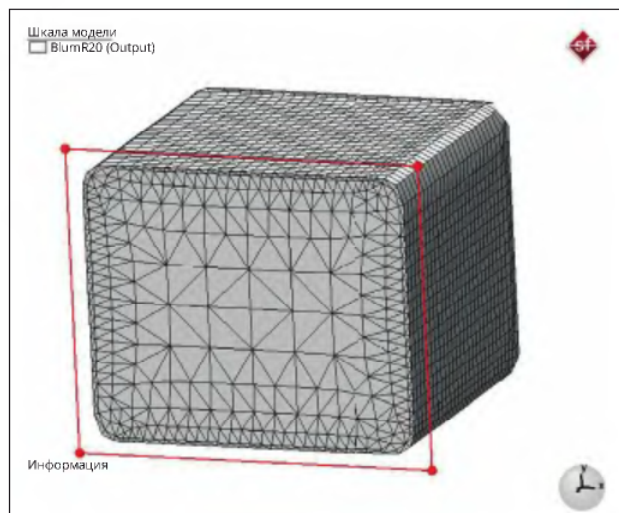


Рис. 4. Конечные элементы для численного моделирования при помощи гексаэдрических элементов

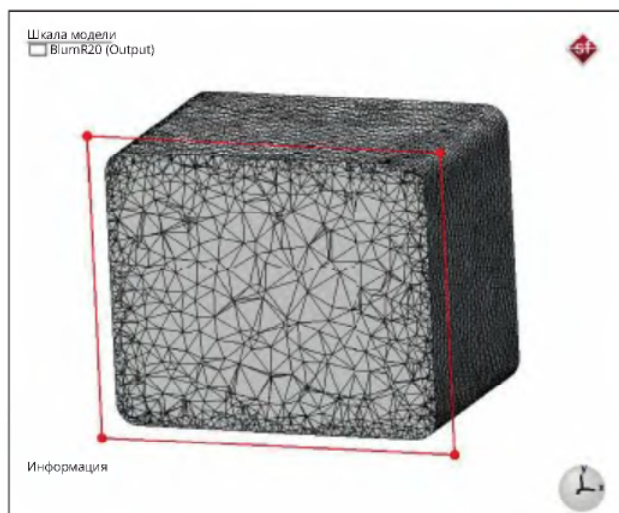


Рис. 5. Конечные элементы для численного моделирования при помощи тетраэдрических элементов

Исследование влияния радиуса сопряжения стенки и дна калибра. Для этого проведен ряд экспериментов с измененным радиусом сопряжения стенки ящичного калибра с дном в диапазоне ± 10 мм от фактического размера на калибрах клетей 1-4. Температура начала прокатки $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура поверхности валков составила $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ для каждого эксперимента. Результаты представлены в табл. 4.

При анализе табл. 4 каких-либо значимых различий как по напряженному состоянию, так и по температурному градиенту не выявлено, за исключением клетки 1. При прокатке в клетю 1 с увеличенным радиусом сопряжения с 27 до 37 мм значительно возросло напряженное состояние с 75 до 89 МПа, минимальная температура составила $918\text{ }^{\circ}\text{C}$ против $951\text{ }^{\circ}\text{C}$ (по сравнению со стандартным процессом прокатки). Возможной причиной стала неравномерность деформации в момент захвата валками бляма, т. е. из-за большого

радиуса скругления калибра (37 мм) происходит более ранний и более интенсивный процесс пластической деформации в углах, по сравнению с остальным телом бляма.

Анализируя полученные данные табл. 1, можно сделать предварительный вывод: чем больше разница между радиусом скругления бляма и радиусом сопряжения стенки и дна ящичного калибра, тем выше уровень локального напряженного состояния на поверхности раската [4].

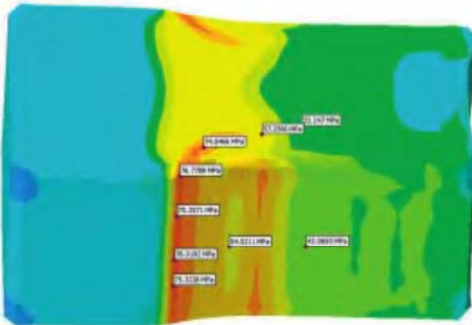
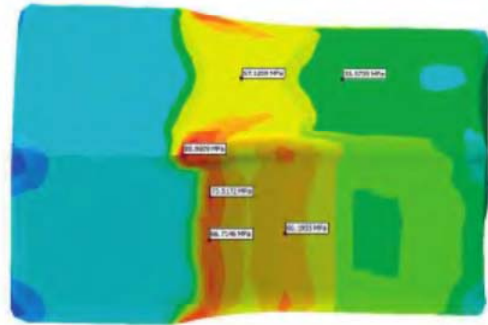

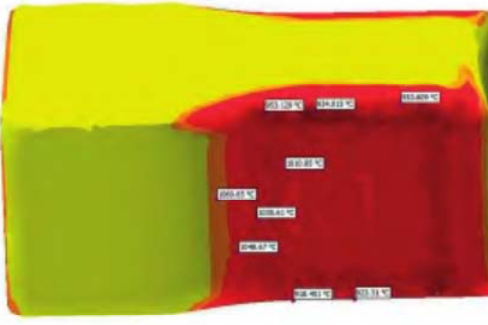
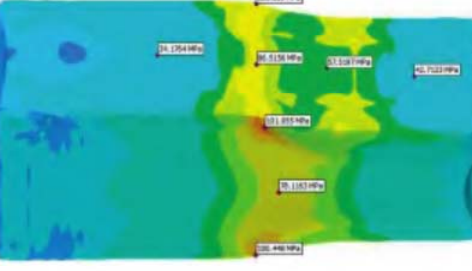
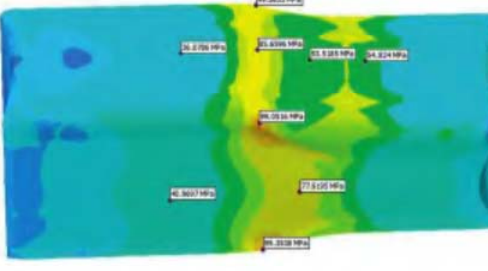
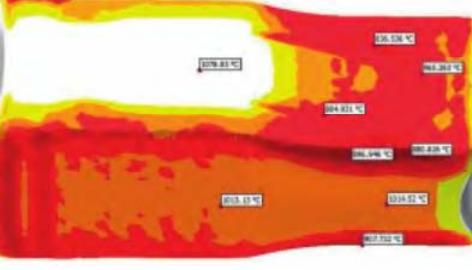
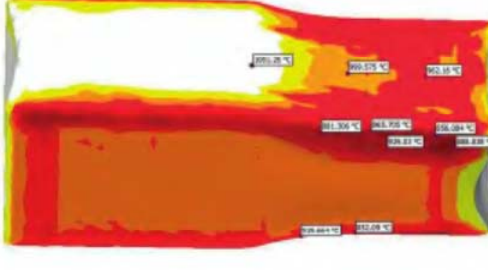
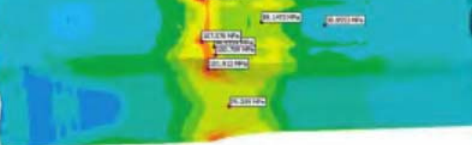
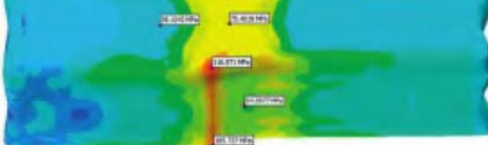
Исследование влияния температуры поверхности прокатного инструмента на температурно-деформационные характеристики прокатки. Как известно из технической литературы по прокатному производству, прокатный инструмент перед прокаткой должен иметь температуру, достаточную для безаварийного процесса прокатки и при этом не должен локально захлаживать поверхность раската. Другими словами, температура прокатного инструмента должна находиться в узком диапазоне температур, обеспечивая оптимальные условия технологических и эксплуатационных параметров. Проведено численное моделирование процесса прокатки с температурой валков $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; результаты эксперимента в сравнении с процессом прокатки при температуре валков $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлены в табл. 5.

Из данных табл. 5 видно, что при температуре начала прокатки $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре поверхности валков $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ напряжения деформации в углах бляма составляют 128 МПа, градиент температур между поверхностью и сердцевиной бляма достигает $352\text{ }^{\circ}\text{C}$. При повышении температуры поверхности валков до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ напряжения деформации снижаются до 120 МПа одновременно с уменьшением градиента температур до $271\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Обсуждение результатов. Полученные результаты оценки стресс-факторов при прокатке в черновой группе клетей можно разделить на две основные группы: критические (температура валков, износ калибра, отсутствие радиуса скругления на бляме после 100 %-ной обточке); незначительные, либо недостаточно изученные факторы в силу довольно приближенных математических моделей (радиус скругления на бляме 20 мм, радиус сопряжения стенки и дна ящичного калибра ± 10 мм). Учитывая критические факторы, вариативность реального процесса, могут возникать локальные очаги захлаживания с одновременным возрастанием локального напряженного состояния, в сравнении с нормальным процессом: в клетю 1 температура – $864\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($951\text{ }^{\circ}\text{C}$), напряжение – 86 МПа (81 МПа); в клетях 4-5 температура – $732\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($848\text{ }^{\circ}\text{C}$), напряжение – 144 МПа (120 МПа). Для более глубокого анализа целесообразно моделирование процесса прокатки при помощи тетраэдрических элементов сеткопостроения.

Моделирование процесса прокатки методом конечных элементов проводилось при помощи гексаэдрических элементов – тип конечного элемента, имеющего шесть граней, который используется для создания полностью объемных сеток [5]. В процессе

Таблица 4. Результаты моделирования процесса прокатки с разными радиусами сопряжения ящичных калибров

Модель	Визуализация температурно-деформационных параметров прокатки	
<p>–R10/+R10 Клеть 1</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 77$ МПа, радиус –10 мм; $\sigma_{\max} = 89$ МПа, радиус +10 мм</p>		
<p>–R10/+R10 Клеть 1</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 952$ °С, радиус –10 мм; $T_{\min} = 918$ °С, радиус +10 мм</p>		
<p>–R10/+R10 Клеть 2</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 101$ МПа, радиус –10 мм; $\sigma_{\max} = 99$ МПа, радиус +10 мм</p>		
<p>–R10/+R10 Клеть 2</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 836$ °С, радиус –10 мм; $T_{\min} = 852$ °С, радиус +10 мм</p>		
<p>–R10/+R10 Клеть 3</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 114$ МПа, радиус –10 мм; $\sigma_{\max} = 117$ МПа, радиус +10 мм</p>		

Модель	Визуализация температурно-деформационных параметров прокатки
<p>-R10/+R10 Клеть 3</p> <p>Выходные данные: $T_{min} = 831\text{ }^{\circ}\text{C}$, радиус -10 мм; $T_{min} = 830\text{ }^{\circ}\text{C}$, радиус $+10\text{ мм}$</p>	
<p>-R10 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $T_{min} = 855\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{max} = 1118\text{ }^{\circ}\text{C}$</p>	
<p>+R10 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $T_{min} = 837\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{max} = 1118\text{ }^{\circ}\text{C}$</p>	
<p>-R10 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{max} = 127\text{ МПа}$</p>	
<p>+R10 Клеть 4-5</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{max} = 128\text{ МПа}$</p>	

Таблица 5. Результаты моделирования процесса прокатки с температурой прокатного инструмента 20 °C и 150 °C

Модель	Визуализация температурно-деформационных параметров прокатки
<p>20 °C/150 °C Клеть 1</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{max} = 81\text{ МПа}$ при температуре 150 °C; $\sigma_{max} = 81\text{ МПа}$ при температуре 20 °C</p>	

Модель	Визуализация температурно-деформационных параметров прокатки
<p>Клеть 1</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 951 \text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\min} = 941 \text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$</p>	
<p>150 °C Клети 4-5</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 848 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\max} = 1119 \text{ }^{\circ}\text{C}$</p>	
<p>20 °C Клети 4-5</p> <p>Выходные данные: $T_{\min} = 795 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\max} = 1118 \text{ }^{\circ}\text{C}$</p>	
<p>150 °C Клети 4-5</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 120 \text{ МПа}$</p>	
<p>20 °C Клети 4-5</p> <p>Выходные данные: $\sigma_{\max} = 128 \text{ МПа}$</p>	

расчета они дают максимально стабильный результат. Общее количество составило 9364 элементов при размере элемента 10 мм (рис. 4). Машинное время расчета одного процесса составляет порядка 30 ч.

Для получения более детализированного и четкого результата численное моделирование рекомендуется проводить при помощи тетраэдрических элементов. Тетраэдрические элементы – это способ сеткопостроителя по созданию 3D геометрии, построенной из тетраэдрических элементов. Общее количество составило 963366 элементов при размере элемента 10 мм (рис. 5). Примерное машинное время расчета одного процесса составляет порядка 300-350 ч при имеющихся мощностях ЭВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом математического моделирования при исследовании стресс-факторов, влияющих на качество поверхности блюма сечением 250×300 мм при прокатке в черновой группе клетей, явилось определение нежелательных условий проката. При прокатке блюмов без радиуса скругления (имитация 100 %-ной обточка блюма) возрастает локальное напряжение в очаге деформации, при этом возрастает температурный градиент между поверхностью валка и раската, что локально снижает пластичность металла при прокатке. Стоит отметить и острый угол на блюме при выработке калибра, который может «завернуть» и прикатать. Моделирование процесса прокатки блюма с износом и выработкой поверхности позволило достоверно определить, что в момент захвата раската валками и непосредственно в самом очаге деформации возникают дополнительные напряжения, которые связаны с повышением шероховатости и отсутствием граничного трения между прокатываемым материалом и поверхностью валка. Был также определен температурный стресс-фактор – прокатка с температурой поверхности валков, близкой к 20 °С (имитация прокатки с интенсивным охлаждением валков или возобновление

прокатки после простоев), что приводило к локальному повышению напряженного состояния и значительному снижению температуры поверхности раската с ухудшением пластичности металла и, как следствие, риском образования поверхностных дефектов. На основе полученных данных для минимизации негативных условий прокатки, оказывающих воздействие на качество поверхности сортового проката, рекомендован ряд мероприятий:

обеспечить наличие радиуса скругления на гранях блюма не менее 10 мм после проведения 100 %-ной зачистки поверхности абразивным способом;

обеспечить планирование производственной кампании сортового проката с допуском поверхностных дефектов до 0,3 мм на валках, не имеющих износа поверхности калибра (по мере выработки поверхности калибра рекомендуется переход на производство продукции неотчетливого назначения);

обеспечить минимально возможный температурный градиент между поверхностью блюма и поверхностью калибра валка, что реализуется внедрением прокатки с контролируемым охлаждением валков и обязательным разогревом прокатного инструмента перед началом прокатки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Каменев С. В.** Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях : учеб. пособ. – Оренбург : Оренбургский гос. ун-т, 2019. – 110 с.
2. **Крагельский И. В., Шедров В. С.** Развитие науки о трении. Сухое трение. М. : Изд. АН СССР, 1956.
3. **Роров V. L.** Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur Numerischen Simulation. – Berlin : Springer-Verlag, 2009. – 328 p.
4. **Смирнов В. К., Шилов В. А., Инатович Ю. В.** Калибровка прокатных валков : учеб. пособ. для вузов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Теплотехник, 2010. – 490 с.
5. **Гончар В. В., Гончар Д. Р.** Модели многогранников. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2010. – 143 с.

Статья поступила 13.04.2022