

УДК 621.771.251

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ТОРЦЕВОЙ ОБЛАСТИ КРАТНОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ СОРТОВОЙ ЗАГОТОВКИ НА РАСТРЕСКИВАНИЕ ТОРЦОВ РАСКАТА ПРИ ПРОКАТКЕ

*Смирнов Е.Н.¹, д.т.н., профессор кафедры «Металлургия и металловедение
им. С.П. Угаровой» (en_smirnov@i.ua)*

Скляр В.А.¹, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия и металловедение им. С.П. Угаровой»

Смирнов А.Н.², д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник

*Белевитин В.А.³, д.т.н., профессор кафедры автомобильной техники, информационных
технологий и методики обучения техническим дисциплинам*

Пивоваров Р.Е.¹, аспирант

¹ Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ МИСиС
(309516, Россия, Старый Оскол, м-н им. Макаренко, 42)

² Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины
(03142, Украина, Киев, бул. Академика Вернадского, 34)

³ Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 69)

Аннотация. Произведен анализ проблем, возникающих при прокатке непрерывнолитой заготовки на современных мини-металлургических и переделных заводах. Показано, что использование в прокатных станах данных заводов клетей трио вызывает необходимость получения заготовок кратной длины из штанг (чаще всего 12-ти метровой длины), которые производятся в условиях прокатного цеха. Отмечено, что последующая прокатка таких кратных заготовок выявила повышенную растрескиваемость передних концов и, как следствие, повышенный расход металла. Проведен анализ возможных причин появления данных растрескиваний. Указано, что этот дефект может появляться в результате формируемого определенного напряженно-деформированного состояния на торце раската, которое обуславливается наличием неравномерного температурного поля вследствие более интенсивного охлаждения торца, режима обжатий в клетях трио и наличия у непрерывнолитой заготовки осевых дефектов. Исследование проводилось на промышленном среднесортном стане 500/370, а также с использованием математического моделирования методом конечных элементов. Изучалось влияние совокупности таких технологических факторов, как температура нагрева заготовок перед прокаткой, временной интервал их транспортировки на участке «нагревательная печь – первая клетка прокатного стана» и параметры макроструктуры осевой области металла. Расчеты с помощью разработанной математической модели указали на необходимость учета наличия на нагретой непрерывнолитой заготовке слоя окалины. Показано, что в зависимости от температуры нагрева и времени транспортировки, перепад температур на торце раската по сравнению с температурой нагрева может составить от 45 до 100 °С, что приведет к неравномерному распределению сопротивления деформации и неблагоприятному напряженно-деформированному состоянию на торце раската. Кроме того, наличие осевого дефекта может влиять на растрескивание в контексте особенностей его формы и трансформации при приложении обжатия. Полученные экспериментальные данные позволили высказать гипотезу о механизме трансформации дефектов несплошности, обусловленных условиями непрерывной разливки и порезки заготовок в трещины на торце раската в ходе прокатки в обжимной клетке.

Ключевые слова: прокатка, непрерывнолитая заготовка, дефекты, обжимная клетка, трещины, напряженно-деформированное состояние, температура, математическое моделирование.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-7-539-547

ВВЕДЕНИЕ

Технологические аспекты прокатки непрерывнолитых сортовых заготовок (НЛЗ) из качественных конструкционных марок стали, отлитых в условиях высокоскоростных сортовых МНЛЗ с малым радиусом изгиба [1], на протяжении последних десятилетий остаются в центре повышенного внимания и изучения [2 – 4]. При этом перекачка вышеназванных заготовок в условиях сортовых станов различного типа показала, что единого подхода к решению технологических

вопросов нет, а проблемы поведения дефектов (как поверхностных, так и макроструктуры) имеют общий характер [5 – 7]. В тоже время, деформирование непрерывнолитой заготовки в технологической линии МНЛЗ на стадии неполной кристаллизации очерчивает новый круг вопросов, связанных с изучением выкатки дефектов в потоке стана, которые получили предварительную деформацию [8, 9].

В большинстве случаев, на современных мини-металлургических заводах кратную длину заготовки для последующей прокатки получают в технологической

линии МНЛЗ. Тем не менее, строительство в последние годы ряда прокатных станов, оснащенных клетями «трио» [10], а также использование непрерывнолитой заготовки на действующих станах линейного типа [11] обусловило тот факт, что получение заготовок кратной длины из штанг (чаще всего 12-ти метровой длины), поставленных с МНЛЗ, производится в условиях прокатного цеха. Наиболее часто для этих целей применяют ломку металла в холодном состоянии или огневую порезку. Вместе с тем, последующая прокатка кратных заготовок выявила повышенную растрескиваемость передних концов и, как следствие, повышенный расход металла [11].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время существуют различные точки зрения на причину растрескивания концов раската в первых проходах сортового стана. Однако большинство авторов говорит о комплексном влиянии совокупности следующих технологических факторов:

- условия охлаждения НЛЗ на адыюстаже МНЛЗ [11];
- способ порезки НЛЗ на кратные длины на складе сортопрокатного цеха [11];
- наличие на торце видимых дефектов макроструктуры осевой зоны: усадочной раковины и осевой пористости;
- температурное состояние торцевой области кратной заготовки, задаваемой в валки;
- формируемое напряженно-деформированное состояние (НДС) на начальной стадии прокатки заготовок (особенно момент захвата), которое определяется условиями деформации отдельных слоев.

Анализ литературных данных показал, что подобное поведение торцов подката при прокатке имело место и в случае получения передельной заготовки по схе-

ме «слиткового передела». В частности, в работе [12] отмечается, что «... усадочные дефекты, оставшиеся на здоровой части (горячекатаного) бьюма, при прокатке раскрываются, и слиток расслаивается на две части в разные стороны».

Известный технологический прием, ранее часто использовавшийся при производстве заготовок на непрерывно-заготовочных станах, а именно замедленное охлаждение в течение определенного времени в специальных футерованных «термосах» или среди «горячих» штабелей [12], в условиях адыюстажа МНЛЗ способствует ослаблению процесса трещинообразования и снижению внутренних напряжений в литой структуре [13].

В то же время, опыт использования непрерывнолитых слябов в условиях ПАО «Азовсталь» показал, что минимизации трещинообразования на торцах способствует процесс замедленного охлаждения непрерывнолитого сляба и их огневая порезка при температурах не ниже 200 °С [14]. В противном случае, пораженность торцов сляба трещинами крайне высока.

Вопрос влияния температурного состояния торцевой области кратной заготовки, задаваемой в валки, лежит в тесной взаимосвязи с вопросом формируемого НДС на начальной стадии прокатки в этих областях. В свете рассматриваемой проблемы особого внимания заслуживают работы [15 – 17].

Проведенные исследования [15, 16] показали, что при прокатке заготовок сечением 150×150 мм разница температуры между поверхностными и центральными слоями достигает 70 – 170 °С. При этом химический состав стали также оказывает влияние на величину перепада (рис. 1, в). В то же время, в работе [17] автор отмечает, что причина нарушения сплошности металла концов заготовок заключается в формируемом НДС, которое определяется условиями деформации отдельных слоев металла (рис. 1, а, б). При малой высоте

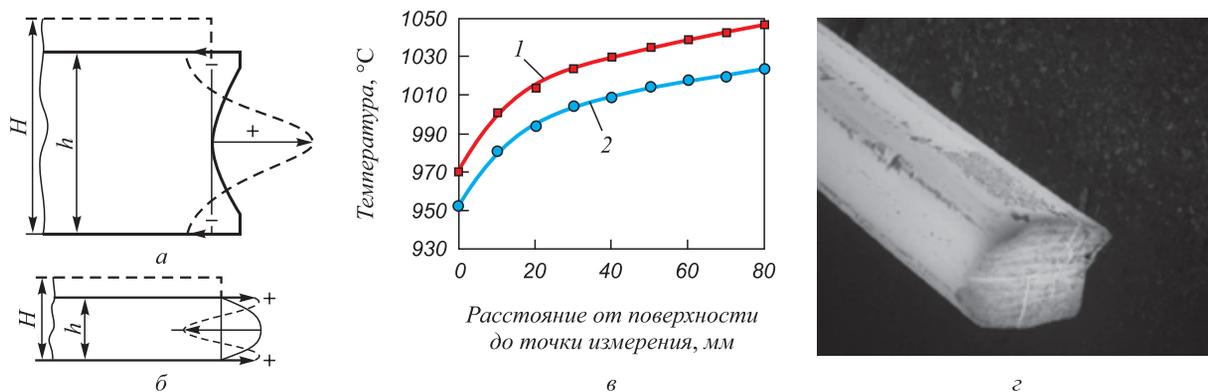


Рис. 1. Распределение напряжений по высоте прокатываемой полосы [14] в полосах большой (а) и малой (б) высоты; распределение температуры по сечению заготовки 150×150 мм (1 – сталь 35ГС, $t_n = 966$ °С; 2 – сталь 33ГТ, $t_n = 951$ °С) после НЗС (в) [11, 12] и вид торца заготовки после двух проходов (z)

Fig. 1. Distribution of stresses along the height of the rolled strip [14] (a – high height strip, б – low height strip), temperature distribution over the section of the billet of 150×150 mm (1 – steel 35GS, $t_n = 966$ °С; 2 – steel 33GT, $t_n = 951$ °С) after a billet mill (v) [11, 12] and the view of the billet’s end after two passes (z)

и достаточном обжати срединные слои увлекают за собой поверхностные, а при большой высоте и малом обжати – срединные слои увлекаются поверхностными. Однако наличие температурного поля в начальный момент прокатки будет способствовать течению более холодных слоев металла именно в продольном направлении, тем самым способствуя росту растягивающих напряжений (+) в срединных слоях и сжимающих (–) в поверхностных [18 – 20]. В этом случае вероятность растрескивания возрастает.

Многофакторная зависимость процесса растрескивания торцов заготовок при прокатке обусловила применение именно методов математического моделирования для изучения процесса на протяжении последних десятилетий [21 – 26]. Однако, несмотря на столь обширный как во временном интервале, так и в технологическом аспекте объем исследований, единого механизма сформулировано не было. Общим является вывод о том, что причина раскрытия передних концов носит комплексную природу и применительно к конкретным условиям прокатки нуждается в дальнейших исследованиях и соответствующих корректировках технологического процесса по их результатам.

Целью работы является исследование влияния совокупности технологических факторов, связанных с температурой нагрева кратных непрерывнолитых сортовых заготовок перед прокаткой, временным интервалом их транспортировки на участке «нагревательная печь – первая клеть прокатного стана» и параметрами макроструктуры осевой области металла на результирующее температурное состояние ее торцевых участков.

ОБЪЕКТ И УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование теплового состояния заготовки, а в дальнейшем раската вдоль технологической линии прокатного стана целесообразно проводить с использованием методов численного математического моделирования [27 – 30]. Полученные результаты сопоставляются с данными фактических замеров температуры. Это позволяет корректно откалибровать разработанную математическую модель и в дальнейшем с ее использованием получать адекватные данные для анализа.

В качестве технологического объекта исследования был выбран среднесортный стан 500/370 [10]. На текущий момент реализовано перепрофилирование стана на использование НЛЗ из углеродистых, качественных конструкционных и рессорно-пружинных марок стали. Поступающие с МНЛЗ [13] двенадцатиметровые штанги на складе делятся на кратные заготовки (~4 м) [11] и сажаются в печь для нагрева. После нагрева в печи четырехметровые заготовки по рольгангу подаются на гидравлические ножницы, где режутся пополам. Затем первая часть заготовки подается через рольганг с горкой на прокатку в обжимной группе. Общее время транспортировки, включая порезку, составляет поряд-

ка 20 – 25 с. Вторая часть загружается обратно в печь. Выдача и передача второй заготовки в стан производится только после того, как первая покинула обжимную клеть. Прокатка двух заготовок из прочных марок стали в одной клетке запрещена. Однако в ряде случаев возникают нештатные ситуации, когда вторая часть не возвращается в печь, а сбрасывается через горку на транспортный рольганг к первой клетке и остывает длительный промежуток времени (до 120 с). Такая схема транспортировки приводит к тому, что значительная часть окалины от ударов с поверхности заготовки просто осыпается и, тем самым, фактически нивелирует ее теплоизолирующий эффект. С точки зрения предотвращения травмирования поверхности заготовки схеме не следует считать весьма технологичной. Однако в случае отсутствия в потоке стана гидросбыва, такой прием удаления (пусть даже частичного) окалины оказался весьма эффективным.

Температура нагрева металла для реализации численного эксперимента принимала следующие фиксированные значения: 1200, 1150, 1100, 1050 °С.

В ходе численного эксперимента время подстуживания, равное времени транспортировки от окна выдачи нагревательной печи до первой клетки, принимали с учетом вышеописанных особенностей технологического процесса (в пределах 20 – 120 с).

Наличие окалины на заготовке может приводить к существенной ошибке при определении температурного состояния. Исследование толщины слоя окалины после выдачи заготовки из печи на стане 500/370 показало, что величина окалины может составлять от 0,6 мм в нормальном режиме работы печи до 3,7 мм в случае сбоя или неполадок. Вследствие этого в ходе численного эксперимента было проведено сравнение условий охлаждения заготовки с окалиной и без нее. В качестве свойств окалины, которые определяют термическое сопротивление слоя, принимали: плотность 4400 кг/м³; удельную теплопроводность 1,16 Вт/м·К и удельную теплоемкость 740 Дж/кг·К [31].

В качестве объекта исследования была выбрана кратная непрерывнолитая заготовка из стали 60С2 сечением 130×130 мм с дефектом осевой зоны. На основании данных визуального обследования торцов кратных заготовок после порезки [11], для численного моделирования приняли три диаметра осевой несплошности: 3, 5 и 8 мм (рис. 2).

Моделирование температурного состояния заготовки, которая транспортируется от нагревательной печи к обжимной клетке, связано с решением нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности с заданными условиями теплообмена [32]

$$\rho(t)c_{\text{эф}}(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial y}\right) \quad (1)$$

и с граничными условиями третьего рода

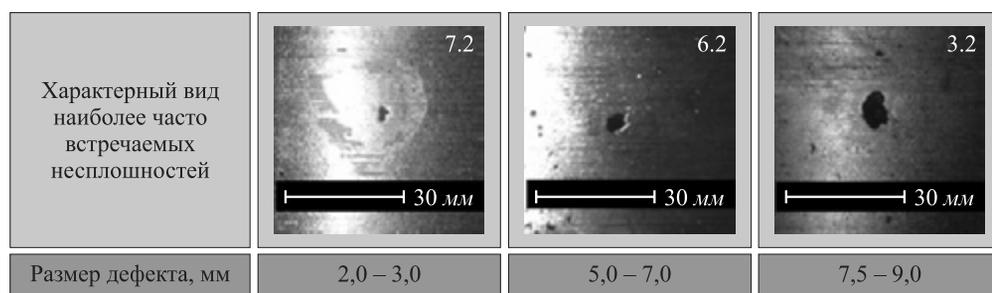


Рис. 2. Вид осевых несплошностей на торце непрерывнолитой сортовой заготовки из стали 60С2 после порезки на пиле

Fig. 2. View of axial discontinuities at the end of continuously cast billets from steel 60S2 after cutting on the saw

$$-\lambda(t) \frac{\partial t_{\text{пов}}}{\partial n} = \alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{ср}}), \quad (2)$$

где $c_{\text{эф}}$ и λ – эффективная удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности соответственно; α – суммарный коэффициент теплоотдачи с поверхности заготовки, Вт/(м²·К); $t_{\text{пов}}$ и $t_{\text{ср}}$ – температура поверхности и среды соответственно, °С; $x = X/l_1$, $y = Y/l_2$, x , y – координаты в поперечном сечении; τ – время; l – координата по длине заготовки.

Начальные условия задавали в виде $t(x, y, 0) = F(x, y)$, где $F(x, y)$ – функция распределения температур в поперечном сечении заготовки на выходе из нагревательной печи.

Была принята модель двухслойной заготовки со слоем окалины. Экзотермический эффект от вторичного окисления металла на освобожденных от печной окалины участках поверхности заготовки не учитывался.

Теплофизические свойства стали определялись по данным работ [33, 34]. Поскольку процесс теплообмена наружной поверхности заготовки с окружающим воздухом происходит за счет конвекции и лучеиспускания, коэффициент теплоотдачи вычисляли согласно рекомендациям работы [35] с использованием формулы

$$\alpha_{\text{Л+К}} = \frac{4,54 \left[\left(\frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{воз}} + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_0 - t_{\text{воз}}} + 2,56 \sqrt[4]{t_0 - t_{\text{воз}}},$$

где t_0 – температура заготовки на выходе из печи; $t_{\text{воз}}$ – температура окружающего воздуха, $t_{\text{воз}} = 30$ °С.

Численная реализация была выполнена с помощью метода конечных элементов. Поскольку задача имеет симметричный характер, в ходе моделирования конечно-элементная модель заготовки представляла собой 1/4 часть, которая была сформирована из двумерных четырехузловых элементов с общим числом узлов более 500 (рис. 3).

Для изучения содержания легирующих элементов в районе трещины от темплетов, отобранных из головной части раската после двух проходов с визуальным

наблюдаемым растрескиванием, механическим образом (на лентопильном станке) вырезались образцы 20×30 мм. Вырезка образцов осуществлялась так, чтобы трещина попадала на середину образца. В дальнейшем производили изготовление шлифа. Полированный микрошлиф травили реактивом Стёда для выявления дендритной структуры [36, 37].

Определение содержания легирующих элементов производили по оси дендритов, в междудендритном пространстве и по трещине методом локального спектрального анализа на лазерном микроанализаторе. В каждой зоне производили не менее 5 – 6 определений. Итоговый результат усредняли.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Визуализация результатов расчетов выполнялась в виде полей распределения температуры как в поперечном (рис. 4, а), так и в продольном (рис. 4, б) направлениях.

Сопоставление температур в эквивалентных точках поперечного сечения для случаев охлаждения с окалиной и при ее отсутствии показало, что величина расхождения в большинстве случаев составляла

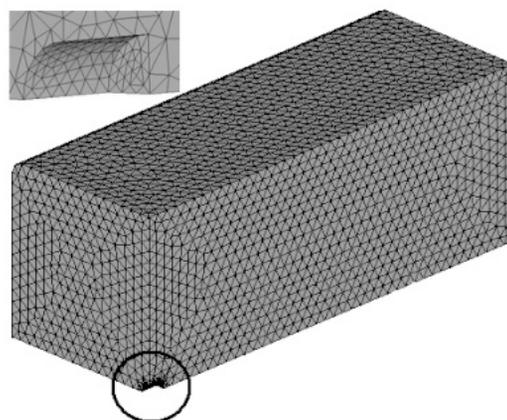


Рис. 3. Разбиение сеткой конечных элементов 1/4 части непрерывнолитой заготовки при наличии видимой несплошности на торце

Fig. 3. Partitioning a finite element mesh of 1/4 of continuous-cast billet in the presence of a visible defect on the end

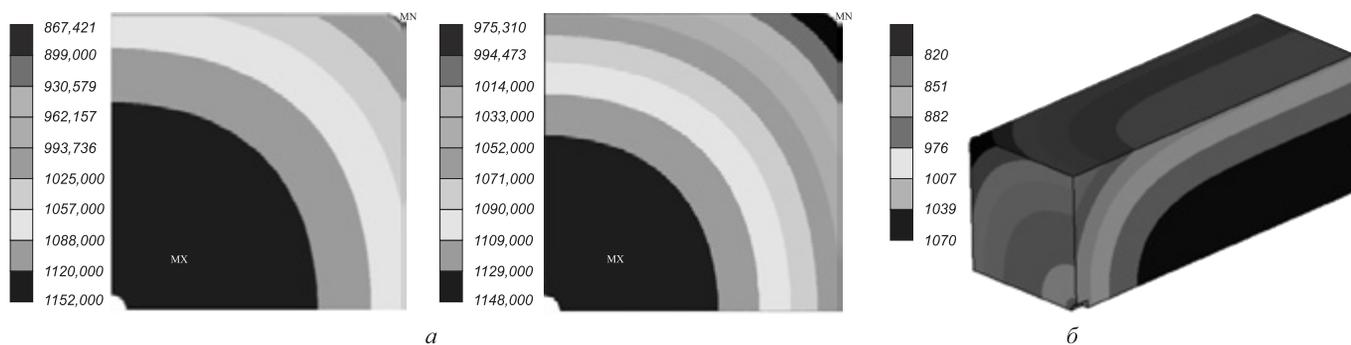


Рис. 4. Визуализация результатов численных экспериментов:

a – поперечное сечение торцевой области заготовки без окалины (слева) и с окалиной толщиной 0,6 мм (справа) при температуре нагрева 1200 °С; *б* – продольное сечение торцевой области заготовки при температуре нагрева 1200 °С (время подстуживания 120 с)

Fig. 4. Visualization of the results of numerical experiments:

a – the cross-section of the billet's end area without scale (left) and with scale with thickness of 0.6 mm (right) at heating temperature of 1200 °С; *б* – longitudinal cross-section of the billet's end area at heating temperature of 1200 °С, (cooling time 120 s)

10 – 30 °С при толщине слоя окалины, характерно для ритмичной работы. В случаях, когда толщина слоя окалины была значительно больше, величина расхождения также возрастала практически в прямо пропорциональной зависимости. Вышеизложенное обусловило необходимость выполнения всех дальнейших расчетов с учетом нахождения окалины на поверхности заготовки.

Обработку результатов экспериментальных данных проводили путем сравнения температуры нагрева заготовки с температурой околоосевой зоны. Результаты представлены на рис. 5. Наиболее существенное влияние на формирование температурного состояния торцевой области заготовки оказывает время выдержки (транспортировки).

В частности установлено, что за время транспортировки 20, 40 и 60 с уменьшение температуры торца заготовки, по сравнению с температурой нагрева, составляет 45 – 60, 60 – 80 и 80 – 100 °С соответственно. Такое снижение температуры, при прочих равных

условиях, может привести к возрастанию термомеханического коэффициента K_f при определении истинного сопротивления деформации $\sigma_{тн}$ для стали 60С2А примерно на 10 %.

Из приведенных данных также видно, что наличие осевого дефекта не оказало значимого влияния на формируемое температурное состояние торцевой области заготовки. Кроме того, по мере снижения температуры нагрева влияние наличия осевого дефекта минимизируется: при температуре нагрева 1200 °С до 10 – 15 °С, а при 1050 °С не более 5 °С.

Следовательно можно высказать гипотезу, согласно которой наличие осевого дефекта может влиять на растрескивание в контексте особенностей его формы и трансформации при приложении обжатия. Как видно из рис. 2, граница внутренней полости имеет извилистый характер. Возможное наличие на ней участков, имеющих V-образный характер, а также проявление максимальной ликвации химических элементов и количества неметаллических включений в слоях металла,

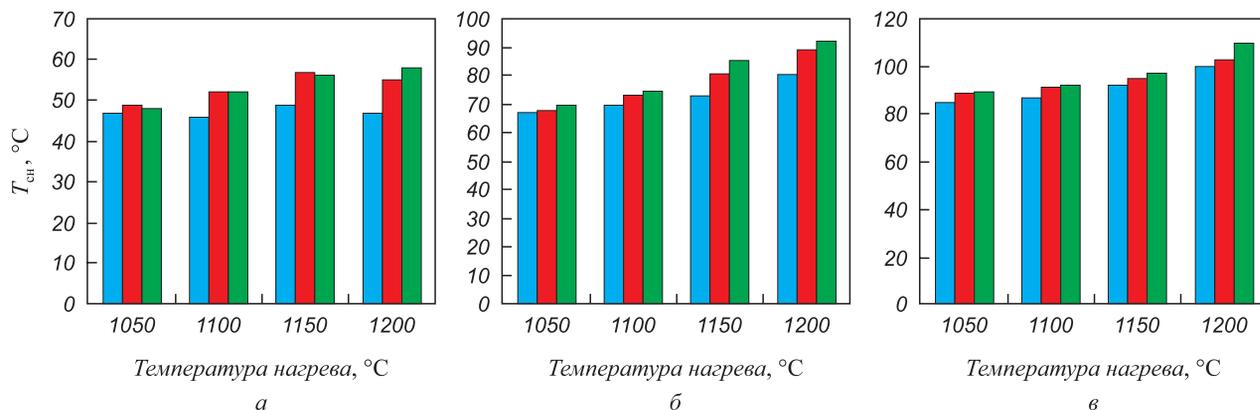


Рис. 5. Снижение температуры торца заготовки $T_{сн}$ по отношению к температуре нагрева в печи в зависимости от времени подстуживания: 20 с (*a*); 40 с (*б*); 60 с (*в*); ■ – $D = 3$ мм; ■ – $D = 5$ мм; ■ – $D = 8$ мм

Fig. 5. Reducing the temperature of the billet's end $T_{сн}$ according to heating temperature in the furnace, depending on the cooling time: 20 s (*a*); 40 s (*б*); 60 s (*в*); ■ – $D = 3$ mm; ■ – $D = 5$ mm; ■ – $D = 8$ mm

близких к границе, будут приводить к тому, что вершины участков, имеющих V-образный характер, станут центрами развития трещины при приложении деформационного воздействия. Возможная локализация неметаллических включений в вершине V-образного участка будет существенным образом уменьшать величину необходимой энергии для развития трещины.

Результаты выполненного исследования по оценке локального содержания легирующих элементов представлены в таблице и в полной мере подтвердили высказанную гипотезу. В частности, из приведенных данных видно, что по содержанию кремния, марганца, алюминия и меди в осях дендритов и в междоусном пространстве различия нет. Наблюдается только тенденция к повышению содержания кремния и марганца в междоусном пространстве. В то же время для трещины четко выявлено повышение содержания кремния и марганца: по кремнию до 33,3 %, марганцу до 40 %.

В пользу данной гипотезы говорят и фотографии на рис. 6. Видно, что характер развития трещины может быть не только в направлении одной плоскости деформации: сжатие (рис. 6, а) и уширение (рис. 6, б), но и в направлении двух плоскостей (рис. 6, в).

Выводы

В работе представлены результаты исследования влияния совокупности технологических факторов (температуры нагрева кратных непрерывнолитых сортовых заготовок перед прокаткой, временного интервала их транспортировки на участке «нагревательная печь – первая клеть прокатного стана», параметров макроструктуры осевой области металла) на результирующее температурное состояние ее торцевых участков, полученные в результате математического моделирования. Анализ результатов позволил установить следующее.

Оценка температурного состояния кратной НЛЗ с видимым дефектом осевой области показала, что наличие последнего приводит к незначительному видоизменению температурного поля, а именно наблюдается снижение температуры на 10 – 13 °С при 1200 °С и не более, чем на 5 °С при температуре 1050 °С. При этом с точки зрения минимизации возможного влияния наличия на торце кратной заготовки видимого дефекта осевой зоны НЛЗ целесообразно температуру нагрева поддерживать в интервале 1050 – 1100 °С.

Микроспектральный анализ травленого шлифа

Microspectral analysis of the etched thin section

Номер пробы	Место расположение спектра	Содержание элементов, %				
		Si	Mn	Al	Cu	Ni
1	Дендрит	1,69	0,74	0,008	0,20	0,24
	Междендритное пространство	1,79	0,78	0,008	0,17	0,20
	Трещина	2,18	0,96	0,004	0,20	0,08
	Трещина	1,91	0,98	0,005	0,25	0,10
2	Дендрит	1,65	0,75	0,006	0,09	0,07
	Междендритное пространство	1,70	0,84	0,006	0,07	0,08
	Трещина	2,20	1,05	0,004	0,09	0,06
	Трещина	1,54	0,83	0,006	0,10	0,10

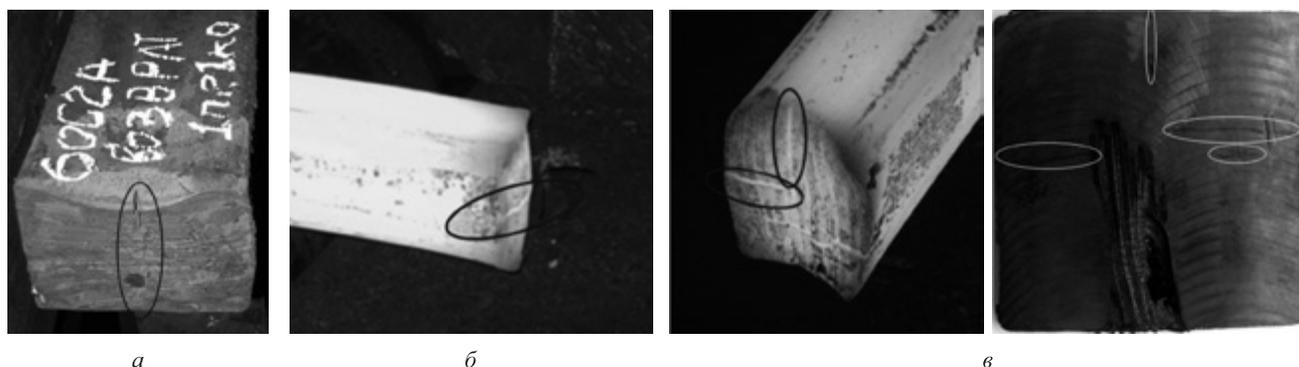


Рис. 6. Характер развития трещин на торце заготовки: а – в направлении сжатия; б – в направлении уширения; в – в обоих направлениях

Fig. 6. Nature of the cracks at the billet's end: а – in direction of compression; б – in direction of broadening; в – in both directions

Результатами локального спектрального анализа содержания легирующих элементов по оси дендритов в междоузном пространстве и по трещине подтверждена высказанная гипотеза, согласно которой наличие осевого дефекта может влиять на растрескивание в контексте особенностей вида границы внутренней полости: крайне извилистый характер с наличием на ней участков, имеющих V-образный характер, с одной стороны, а также проявление максимальной ликвации химических элементов в слоях металла, близких к трещине, с другой. Применительно к исследуемой марки стали 60С2 увеличение содержания кремния достигает 33,3 %, марганца – до 40 %. Это приведет к тому, что вершины участков, имеющих V-образный характер, станут центрами развития трещины при приложении деформационного воздействия. Возможная локализация неметаллических включений в вершине V-образного участка будет существенным образом уменьшать величину необходимой энергии для развития трещины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Смирнов А.Н., Смирнов Е.Н., Скляр В.А. и др. Вопросы использования непрерывнолитой заготовки для производства сортового проката из конструкционных сталей // *Сталь*. 2018. № 4. С. 7 – 12.
- Farrugia D. Modelling central consolidation during hot rolling of cast products // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 716. P. 728 – 735.
- Рашников В.Ф., Селезнев И.В., Радюкевич К.Л. и др. Освоение производства сортового проката из непрерывнолитой заготовки // *Сталь*. 2004. № 12. С. 57 – 60.
- Ji Y., Tang H., Lan P. etc. Effect of dendritic morphology and central segregation of billet castings on the microstructure and mechanical property of hot-rolled wire rods // *Steel Research International*. 2017. Vol. 88. No. 8. Paper no. 1600426.
- Мартьянов Ю.А., Теляков А.В., Рубцов Ю.Т. и др. Исследование выкатываемости продольных дефектов сортовой заготовки // *Сталь*. 2006. № 2. С. 31 – 34.
- Перетятко В.Н., Мартьянов Ю.А., Уманский А.А., Федоров А.А. Исследование формоизменения продольных дефектов при прокатке на непрерывном мелкосортовом стане // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2008. № 8. С. 12 – 15.
- Minaev A.A., Nosanev A.G., Smirnov E.N. etc. Unit for accelerated cooling of reinforcement bars in the line of a 330 mill after deformation // *Metallurgist*. 1990. No. 1. P. 32.
- Смирнов Е.Н., Скляр В.А., Смирнов О.Е. и др. Исследование поведения дефектов макроструктуры предварительно деформированной в линии МНЛЗ непрерывнолитой сортовой заготовки при прокатке // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 5. С. 399 – 407.
- Смирнов Е.Н., Скляр В.А., Белевитин В.А. и др. Развитие подходов к исследованию на физических моделях механизмов «залечивания» дефектов сплошности осевой зоны непрерывнолитой заготовки // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 5. С. 322 – 327.
- Смирнов Е.Н., Смирнов А.Н., Скляр В.А. и др. Оценка технологической целесообразности снижения температуры начала прокатки в условиях стана с обжимными клетями трио // *Сталь*. 2018. № 6. С. 21 – 26.
- Серов А.И., Смирнов Е.Н., Скляр В.А. и др. Исследование влияния способа порезки непрерывнолитых заготовок на кратные длины перед прокаткой на растрескивание торцов при горячем деформировании в калибрах // *Технология металлов*. 2018. № 5. С. 8 – 14.
- Рудской А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства. – СПб.: Наука, 2008. – 527 с.
- Серов А.И. Создание и развитие электрометаллургического комплекса ООО «Электросталь» // *Металлы и литье Украины*. 2010. № 9/10. С. 14 – 17.
- Исаев О.Б. Влияние углерода и малых примесей цветных металлов на качество непрерывнолитой заготовки // *Металлург*. 2009. № 9. С. 68 – 72.
- Клименко В.М., Вейсбейн А.Д., Минаев А.А. Поля температуры по сечению раската при прокатке // *Сталь*. 1978. № 4. С. 348 – 349.
- Клименко В.М., Минаев А.А., Вейсбейн А.Д., Темнохух В.А. Температурное поле металла при прокатке на обжимных станах. – В кн.: Обработка стали в горячем состоянии. – Острава, 1978. С. 353 – 359.
- Чижиков Ю.М. Прокатываемость стали и сплавов. – М.: Металлургияиздат, 1961. – 451 с.
- Kukhar V., Artiukh V., Butyrin A., Prysiashnyi A. Stress-strain state and plasticity reserve depletion on the lateral surface of workpiece at various contact conditions during upsetting // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. Vol. 692. P. 201 – 211.
- Kukhar V., Artiukh V., Serduik O., Balalayeva E. Form of gradient curve of temperature distribution of lengthwise the billet at differentiated heating before profiling by buckling // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 165. P. 1693 – 1704.
- Минаев А.А., Смирнов Е.Н. Белевитин В. А., Савицкий О.С. Исследование полей деформации при прокатке овальных заготовок с неравномерным распределением температуры по сечению // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1992. № 6. С. 20 – 24.
- Wallero A. Closing of a central longitudinal pore in hot rolling // *Journal of Mechanical Working Technology*. 1985. Vol. 12. No 2. P. 233 – 242.
- Tanaka M., Ono S., Tsuneno M. A numerical analysis on void crushing during side compression of round bar by flat dies // *J. Jpn. Soc. Technol. Plasticity*. 1987. Vol. 28. P. 238 – 244.
- Wang A., Thomson P.F., Hodgson P.D. A study of pore closure and welding in hot rolling process // *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. Vol. 60. No. 1 – 2. P. 95 – 102.
- Hamzah S., Stahlberg U. A new pore closure concept for the manufacturing of heavy rings // *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. Vol. 110. No. 3. P. 324 – 333.
- Banaszek G., Stefanik A. Theoretical and laboratory modeling of the closure of metallurgical defects during forming of a forging // *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Vol. 177. No. 1–3. P. 238 – 242.
- Park J. Prediction of void closure in a slab during various deformation processes // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2011. Vol. 25. No. 11. P. 2871 – 2876.
- Leinonen O., Ilmola J., Seppälä O. etc. Experimental determination of heat transfer coefficients in roll bite and air cooling for computer simulations of 1100MPa carbon steel rolling // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 1960. Paper no. 170009.
- Stetina J., Kavicka F. Numerical model of heat transfer and mass transfer during the solidification of a concasting steel // *ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference*. 2011. P. 171 – 179.
- Chen Y., Liu X., Silaen A.K. etc. Investigation of combustion and heat transfer in an industrial reheating furnace using CFD // *Minerals, Metals and Materials Series, Part F3*. 2018. P. 187 – 198.
- Rout M., Pal S.K., Singh S.B. Finite element modeling of hot rolling: Steady- and unsteady-state analyses // *Computational Methods and Production Engineering: Research and Development*. 2017. P. 83 – 124.
- Северденко В.П., Макушок Е.М., Равин А.Н. Окалина при горячей обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
- Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И. Нагрев стали: Справочное пособие. – Минск: Вышэйшая школа, 1990. – 314 с.

33. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
34. Миленин А.А., Дья Х., Стеблов А.Б. и др. Математическое моделирование прокатки непрерывного слитка из стали ШХ15 на стадии неполной кристаллизации его сердцевины // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2003. С. 178 – 183.
35. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
36. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. Том II / Л.В. Агамиров, М.А. Алимов, Л.П. Бабичев и др. / Под общ. ред. Е.И. Мамаевой. – М.: Машиностроение, 2010. – 852 с.
37. Солнцев Ю.П., Вологжанина С.А. Материаловедение. – М.: Академия, 2011. – 496 с.

Поступила в редакцию 6 февраля 2019 г.

После доработки 13 марта 2019 г.

Принята к публикации 30 мая 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 7, PP. 539–547.

INFLUENCE OF THERMAL STATE OF THE END AREA OF MULTIPLE CONTINUOUS-CAST BILLET ON CRACKING OF THE ENDS OF HOT-ROLLED BREAKDOWN AT ROLLING

E.N. Smirnov¹, V.A. Sklyar¹, A.N. Smirnov², V.A. Belevitin³, R.E. Pivovarov¹

¹Ugarov Stary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISiS”, Stary Oskol, Belgorod Region, Russia

²Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

³South Ural State Humanitarian Pedagogical University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The authors have made an analysis of problems arising in the rolling of continuous-cast billets in the modern mini-metallurgical and rerolling plants. It is shown that the use of trio stands in rolling mills of these plants makes it necessary to obtain billets of multiple lengths from bars (most often of 12-meter length) produced in the rolling shop. The subsequent rolling of such multiple billets has revealed increased cracking of the front edge and, as a result, increased metal consumption. Analysis of the causes of these cracks has been made. It was indicated that this defect can appear as a result of a certain stress-strain state formed at the end of hot-rolled breakdown. It is caused by the presence of an uneven temperature field due to more intensive end cooling, to reduction mode in the trio stand and to the presence of axial defects in the continuous-cast billet. The study was conducted on the industrial medium-grade mill 500/370, as well as using mathematical modeling by finite element method. The influence of a set of technological factors, such as temperature of the billets heating before rolling, the time interval of their transportation on the site “heating furnace – first stand of the rolling mill” and parameters of the macrostructure of axial area of the metal were investigated. Calculations by the developed mathematical model have indicated the need to take into account the presence of a scale layer on the heated continuous-cast billet. It is shown that depending on the heating temperature and transport time, the temperature difference at the billet’s end compared to the heating temperature can be from 45 to 100 °C. It will lead to an uneven distribution of deformation resistance and unfavorable stress-strain state at the billet’s end. In addition, the presence of an axial defect can affect the cracking because of its shape and its transformation during reduction. Obtained experimental data allowed hypothesizing the mechanism of transformation of discontinuity defects into cracks at the billet’s end due to the conditions of continuous casting and cutting of billets during rolling in the reduction stand.

Keywords: rolling, continuous-cast billet, defects, reduction stand, cracks, stress-strain state, temperature, mathematical modeling.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-7-539-547

REFERENCES

- Smirnov A.N., Smirnov E.N., Sklyar V.A., Belevitin V.A., Pivovarov R.E. Producing structural-steel bar from continuous-cast billet. *Steel in Translation*. 2018, vol. 48, no. 4, pp. 233–239.
- Farrugia D. Modelling central consolidation during hot rolling of cast products. *Key Engineering Materials*. 2016, vol. 716, pp. 728–735.
- Rashnikov V.F., Seleznev I.V., Radyukevich K.L., Gasilin A.V., Sirotyuk A.P. Production of rolled bar from continuous-cast billet. *Steel in Translation*. 2004, vol. 34, no. 12, pp. 40–45.
- Ji Y., Tang H., Lan P., Shang C., Zhang J. Effect of dendritic morphology and central segregation of billet castings on the microstructure and mechanical property of hot-rolled wire rods. *Steel Research International*. 2017, vol. 88, no. 8, paper no. 1600426.
- Mart’yanov Yu.A., Telyakov A.V., Rubtsov Yu.T., Efimov O.Yu., Grechin V.V. Roll out of longitudinal defects of the billet. *Stal’*. 2006, no. 2, pp. 31–34. (In Russ.).
- Peretyat’ko V.N., Mart’yanov Yu.A., Umanskii A.A., Fedorov A.A. Deformation of longitudinal defects when rolling on a continuous light-section mill. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, no. 8, pp. 12–15. (In Russ.).
- Minaev A.A., Nosanev A.G., Smirnov E.N., Bublik P.F., Shishkevich V.V. Unit for accelerated cooling of reinforcement bars in the line of a 330 mill after deformation. *Metallurgist*. 1990, no. 1, p. 32.
- Smirnov E.N., Sklyar V.A., Smirnov O.E., Belevitin V.A., Pivovarov R.E. Research of the behavior of macrostructure defects of the pre-deformed continuous cast billets during rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 5, pp. 399–407. (In Russ.).
- Smirnov E.N., Sklyar V.A., Belevitin V.A., Shmyglya R.A., Smirnov O.E. Development of the study of mechanism of “healing” defects of continuous cast billet axial zone on a physical model. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 5, pp. 322–327. (In Russ.).
- Smirnov E.N., Smirnov A.N., Sklyar V.A., Belevitin V.A., Eron’ko S.P., Pivovarov R.E. Effects of decreasing the initial rolling temperature in three-high roughing stands. *Steel in Translation*. 2018, vol. 48, no. 6, pp. 381–387.
- Serov A.I., Smirnov E.N., Sklyar V.A., Smirnov A.N. etc. Effect of the method of continuously-cast billets cutting to multiple lengths before rolling on the ends cracking during hot deformation in calibers. *Tekhnologiya metallov*. 2018, no. 5, pp. 8–14. (In Russ.).
- Rudskoi A.I., Lunev V.A. *Teoriya i tekhnologiya prokatsnogo proizvodstva* [Theory and technology of rolling production]. St. Petersburg: Nauka, 2008, 527 p. (In Russ.).
- Serov A.I. Creation and development of the steel complex LLC “Electrostal”. *Metally i lit’ e Ukrainy*. 2010, no. 9/10, pp. 14–17. (In Russ.).

14. Isaev O.B. Effect of carbon and small concentrations of nonferrous metal impurities on continuously-cast billet quality. *Metallurgist*. 2009, vol. 53, no. 9-10, pp. 577-584.
15. Klimenko V.M., Veisbein A.D., Minaev A.A. Temperature fields along cross section of hot-rolled breakdown during rolling. *Stal'*. 1978, no. 4, pp. 348-349. (In Russ.).
16. Klimenko V.M., Minaev A.A., Veisbein A.D., Temnokhud V.A. Temperature field of the metal at rolling in reduction mills. In: *Ob-rabatyvaemost' stali v goryachem sostoyanii* [Machinability of steel in hot state]. Ostrava, 1978, pp. 353-359. (In Russ.).
17. Chizhikov Yu.M. *Prokatyvaemost' stali i splavov* [Rollability of steel and alloys]. Moscow: Metallurgizdat, 1961, 451 p. (In Russ.).
18. Kukhar V., Artiukh V., Butyrin A., Prysiazhnyi A. Stress-strain state and plasticity reserve depletion on the lateral surface of workpiece at various contact conditions during upsetting. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018, vol. 692, pp. 201-211.
19. Kukhar V., Artiukh V., Serduik O., Balalayeva E. Form of gradient curve of temperature distribution of lengthwise the billet at differentiated heating before profiling by buckling. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 165, pp. 1693-1704.
20. Minaev A.A., Smirnov E.N., Belevitin V. A., Savitskii O.S. Deformation fields during rolling of oval billets with uneven temperature distribution over the cross section. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1992, no. 6, pp. 20-24. (In Russ.).
21. Wallero A. Closing of a central longitudinal pore in hot rolling. *Journal of Mechanical Working Technology*. 1985, vol. 12, no. 2, pp. 233-242.
22. Tanaka M., Ono S., Tsuneno M. A numerical analysis on void crushing during side compression of round bar by flat dies. *J. Jpn. Soc. Technol. Plasticity*. 1987, vol. 28, pp. 238-244.
23. Wang A., Thomson P.F., Hodgson P.D. A study of pore closure and welding in hot rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996, vol. 60, no. 1-2, pp. 95-102.
24. Hamzah S., Stahlberg U. A new pore closure concept for the manufacturing of heavy rings. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001, vol. 110, no. 3, pp. 324-333.
25. Banaszek G., Stefanik A. Theoretical and laboratory modeling of the closure of metallurgical defects during forming of a forging. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, vol. 177, no. 1-3, pp. 238-242.
26. Park J. Prediction of void closure in a slab during various deformation processes. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2011, vol. 25, no. 11, pp. 2871-2876.
27. Leinonen O., Ilmola J., Seppälä O. etc. Experimental determination of heat transfer coefficients in roll bite and air cooling for computer simulations of 1100MPa carbon steel rolling. *AIP Conference Proceedings*. 2018, vol. 1960, paper no. 170009.
28. Stetina J., Kavicka F. Numerical model of heat transfer and mass transfer during the solidification of a concasting steel. *ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference*. 2011, pp. 171-179.
29. Chen Y., Liu X., Silaen A.K., Johnson K., Zhou C.Q. Investigation of combustion and heat transfer in an industrial reheating furnace using CFD. *Minerals, Metals and Materials Series. Part F3*. 2018, pp. 187-198.
30. Rout M., Pal S.K., Singh S.B. Finite element modeling of hot rolling: Steady- and unsteady-state analyses. *Computational Methods and Production Engineering: Research and Development*. 2017, pp. 83-124.
31. Severdenko V.P., Makushok E.M., Ravin A.N. *Okalina pri goryachei obrabotke metallov davleniem* [Scale at hot processing of metals by pressure]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 208 p. (In Russ.).
32. Samoilovich Yu.A., Timoshpol'skii V.I. *Nagrev stali: spravochnoe posobie* [Heating of steel: Reference guide]. Minsk: Vysheishaya shkola, 1990, 314 p. (In Russ.).
33. Kazantsev E.I. *Promyshlennye pechi. Spravochnoe rukovodstvo dlya raschetov i proektirovaniya* [Industrial furnaces. Reference guide for calculations and design]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 368 p. (In Russ.).
34. Milenin A.A., Dyja H., Steblov A.B. etc. Mathematical modeling of rolling of a continuous ingot of steel ShKh15 at the stage of incomplete crystallization of the heart. *Udoskonalennyya protsesiv i obladnannyya obrobki tiskom v metallurgii i mashinobuduvanni: tematich. zb. nauk. pr. Kramators'k: DDMA*, 2003, pp. 178-183. (In Russ.).
35. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.).
36. Agamirov L.V., Alimov M.A., Babichev L.P. etc. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva. Ispytaniya metallicheskih materialov* [Physical and mechanical properties. Testing of metal materials]. Mamaeva E.I. ed. Vol. 2. Moscow: Mashinostroenie, 2010, 852 p. (In Russ.).
37. Solntsev Yu.P., Vologzhanina S.A. *Materialovedenie* [Materials science]. Moscow: Akademiya, 2011, 496 p. (In Russ.).

Information about the authors:

E.N. Smirnov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallurgy and Metal Science named after S.P. Ugarova" (en_smirnov@i.ua)

V.A. Sklyar, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgy and Metal Science named after S.P. Ugarova"

A.N. Smirnov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher

V.A. Belevitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Automotive Technics, Information Technologies and Teaching Methods of Technical Sciences

R.E. Pivovarov, Postgraduate

Received February 6, 2019

Revised March 13, 2019

Accepted May 30, 2019