

УДК 621.771.25

Е. Н. СМІРНОВ, А. И. СЕРОВ, В. А. СКЛЯР, Е. О. ДОМБРОВСКИЙ, О. Е. СМІРНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ СОРТОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ И ПОВЕДЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ЕЕ ОСЕВОЙ ЗОНЫ ВО ВРЕМЯ ПРОКАТКИ

Приведены результаты заводских исследований макроструктуры сортовой непрерывнолитой сортовой заготовки из сталей 45 и У7. Установлено, что, не смотря на в целом достаточно высокое качество макроструктуры, в осевой зоне присутствует пористость и ликвация которая приводит к проблемам при последующей прокатке. С учетом выявленных дефектов осевой несплошности, разработана математическая модель и исследован процесс прокатки непрерывнолитой заготовки в обжимной клети.

Ключевые слова: сортовая заготовка, макроструктура, моделирование, осевая пористость, охлаждение, прокатка.

Постановка проблемы. На предприятиях, которые начали использовать непрерывнолитую заготовку из качественных конструкционных марок стали, появилась потребность не только в оценке достигаемого качества конечной металлопродукции, но и в определении границ типоразмеров действующего и вновь вводимого сортамента профилей, в пределах которого качество последних будет соответствовать востребованному потребителями, исходя из достигнутого на предприятии уровня качества исходной заготовки. К основным направлениям улучшения технологии производства непрерывнолитой сортовой заготовки относят: стабильность химического состава стали и макроструктуры по сечению непрерывнолитого слитка [1, 2]; снижение содержания вредных примесей [3, 4]; снижение количества «опасных» неметаллических включений и минимизация поверхностных дефектов [5, 6].

В тоже время, несмотря на огромный объем исследований, связанных с оценкой качества непрерывнолитой заготовки, создание эффективных технологических схем и моделей производства стальной металлопродукции, позволяющих корректировать технологию последующего передела в зависимости от результатов предыдущего, невозможно без комплексного предварительного исследования качества металлопродукции на каждом из этапов вновь созданной технологической схемы.

Начиная с 2009 года, ПАО «Донецкий металлпрокатный завод» осуществил перевод стана 500/370 на использование непрерывнолитой заготовки малого сечения с существенным расширением марочного состава прокатываемых марок сталей: качественные углеродистые, низколегированные, рессорно – пружинные и т. д. Проведенные мероприятия по реконструкции позволили в целом повысить качество готового проката, однако, по-прежнему периодически встречаются случаи раскрытия торцов непрерывнолитой заготовки в первых проходах (рис. 1, а), которые при дальнейшей прокатке превращаются в расслоения (рис. 1, б).

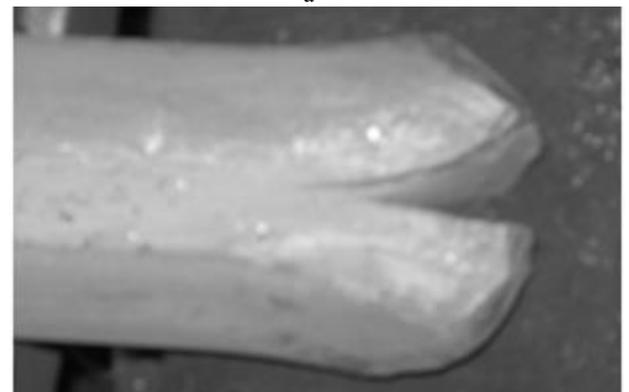
В настоящее время существуют различные точки зрения на причину раскрытия передних концов раскатов из непрерывнолитых слитков в процессе первичного деформирования, а именно – в

первых проходах. К наиболее часто встречаемым причинам относятся:

- усадочные дефекты [7]
- быстрое охлаждение и порезка при температурах ниже 200 °С [8].
- формируемое напряженно-деформируемое состояние (НДС), которое определяется условиями деформации отдельных слоев металла [9].



а



б

Рис. 1 – Внешний вид переднего торца подката:
а – с растрескиванием после трех проходов
и б – расслоение раската после девяти проходов:
сталь 60С2, заготовка сечением 130х130 мм

Таким образом, проведенный анализ однозначно свидетельствует, что причина раскрытия передних концов имеет, скорее всего, комплексную природу и, применительно к условиям прокатки непрерывнолитых сортовых заготовок

малого сечения, нуждается в дальнейшем исследовании, особенно в части совместного влияния неравномерного температурного поля на торцах заготовки и осевых дефектов несплошности.

Цель (задачи) исследования. Целью настоящих исследований являлась оценка качества макроструктуры по сечению непрерывнолитой сортовой заготовки и исследование влияния величины дефектов осевой области НЛЗ температуры нагрева и времени выдержки перед задачей в первую клетку на формируемое температурное состояние ее торцевых областей и поведение центральной несплошности в процессе прокатки.

Основной материал исследований. В качестве объекта исследования была выбрана непрерывнолитая заготовка, отлитая через трёхплитный шибберный затвор с полной защитой, струи от вторичного окисления на участке «сталь – ковш – кристаллизатор» в условиях ПАО «Электросталь» (г. Курахово, Украина) [10]. На первом этапе исследования ограничились двумя марками стали:

- сталь 45 по ГОСТ 1050–88, сечение заготовки 130x130 мм;
- сталь У7 по ДСТУ 3833–98, сечение заготовки 125x125 мм.

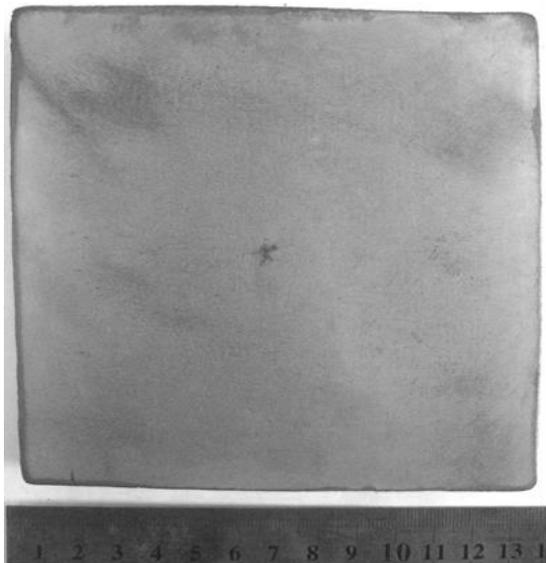


Рис. 2 – Макроструктура непрерывнолитой заготовки сечением 130x130 мм из стали 45

Из каждой отобранной пробы изготавливались поперечные темплеты (рис. 2.) для оценки макроструктуры заготовки по СОУ МПП 77.040-199:2007, а также продольные темплеты (рис. 3) – для исследования характера ликвации химических элементов в поперечном и продольном направлениях.

Первичная сопоставительная оценка уровня параметров, по которым производился контроль макроструктуры непрерывнолитых заготовок из стали 45 и У7, показала, что исследуемые плавки имеют весьма близкий уровень качества, который может характеризоваться величинами, представленными в табл. 1. Анализ приведенных в

табл. 1 данных позволяет говорить о достаточно высоком качестве полученной непрерывнолитой заготовки.

В свою очередь, анализ макроструктуры металла на продольных темплетах показал, что качество осевой зоны непрерывнолитой заготовки имеет нестабильный характер. Вследствие этого балл осевой пористости и осевой ликвации во многом предопределяется местом вырезки темплет и, что естественно, может иметь достаточно широкий диапазон колебаний. В рассматриваемом случае ширина диапазона колебаний параметров составила 1,5 балла.

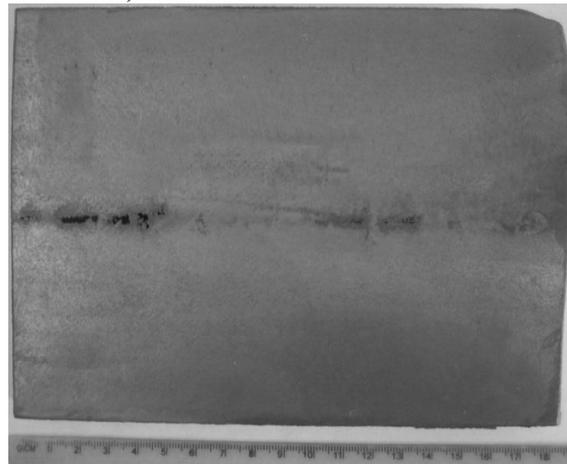


Рис. 3 – Макроструктура непрерывнолитой заготовки (продольный темплет) сечением 130x130 мм из стали 45

Однако следует особо отметить, что имеющиеся колебания имели место в первой половине шкалы (0–2 балла), используемой для описания макроструктуры заготовки, имеющей достаточно высокое качество [11]

Подобные исследования непрерывнолитой заготовки из стали 60С2 сечением 150x150 мм позволили создать первичную классификацию видов осевых нарушений сплошности (рис. 4). На основании этого, для численного моделирования были приняты три диаметра осевых дефектов: 3, 5 и 8 мм.

Исследование неоднозначных процессов теплового состояния заготовки в течение пластического деформирования наиболее часто реализуется с использованием методов математического моделирования. В этом случае, любая математическая модель традиционно состоит из 3 частей: температурное состояние металла; вязкопластическая деформация заготовки; термическое воздействие рабочего вала.

На первом шаге рассматриваемого исследования решалась задача, связанная с оценкой температурного состояния торца кратной НЛЗ на участке "нагревательная печь – обжимная клетка" в зависимости от следующих факторов: наличия слоя печной окалины на поверхности и дефектов макроструктуры, визуально наблюдающихся на заготовке, а также времени выдержки перед прокаткой.

Таблица 1 – Параметры макроструктуры непрерывнолитой заготовки сечением 125x125 мм из стали У7 (согласно СОУ МПШ.77.040-199:2007)

Контролирующая лаборатория		Предприятие-изготовитель		Предприятие-потребитель	Предприятие-изготовитель		Предприятие-потребитель
Место отбора темплета		Плавка 1		Плавка 1	Плавка 2		Плавка 2
% от массы плавки		20,0	70,0	Выборочно	20,0	70,0	Выборочно
Макроструктура, балл	ОП	0,0	1,0	2	0,0	0,0	1,5
	ОЛ	0,5	0,5	2	0,5	0,5	2,0
	ТО	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1,0
	ПТС	0,0	1,5	1,5	0,5	0,5	0,0
	ПТУ	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
	ТНК	0,5	0,0	1,0	0,0	0,5	0,0
	ВНХ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Примечание		-	-	Наблюдаются 3 подкорковых пузыря	На обратной стороне темплета имеется усадка 1x3мм		Подкорковых пузырей нет

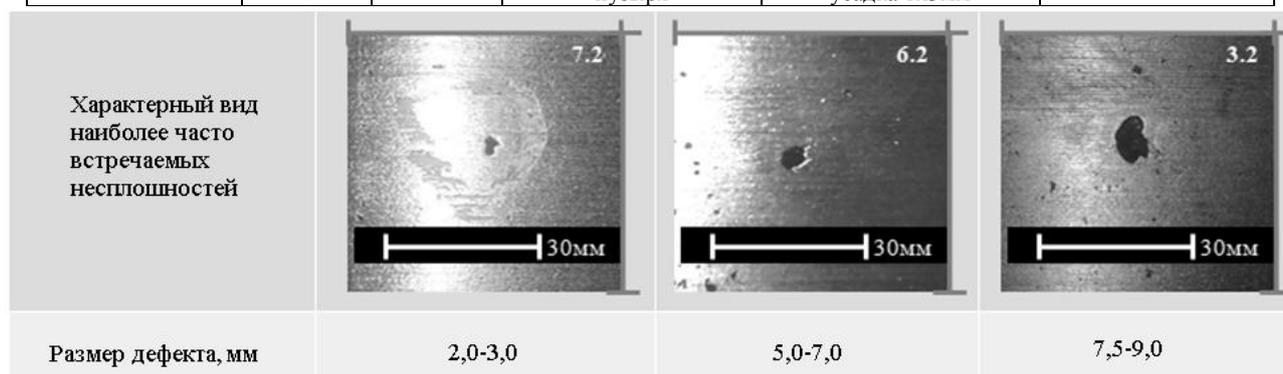


Рис. 4 – Вид типичных визуально наблюдаемых дефектов на торце кратной непрерывнолитой сортовой заготовке из стали 60С2: порезка на пилах

Время технологической выдержки, равное времени транспортировки от окна выдачи печи до первой клетки, изменялось в пределах от 20...120 с. Температура начала прокатки для численного эксперимента принимала следующие фиксированные значения: 1050 °С, 1100 °С, 1150 °С, 1200 °С.

Разработанная математическая модель реализована с использованием МКЭ в программном комплексе ANSYS. При создании модели осевой несплошности в заготовке принимали, что она имеет цилиндрическую форму с вышеуказанными дефектами и распространяется внутрь заготовки от торца, взаимодействующего с валками, на глубину не более длины очага деформации.

Для корректного учета фактической толщины слоя окалины на поверхности заготовки в разработанной модели после выдачи из печи выполнили промышленные замеры. Установлено, что толщина слоя окалины может колебаться от 0,6 мм в нормальном режиме работы печи до 5,7 мм в случае сбоя или неполадок. Анализ литературных источников показал, что при таких толщинах слоя, его не учет наличия на заготовке может приводить к существенной ошибке при определении теплового состояния. Для дальнейшего моделирования приняли следующие характеристики: плотность 4400 кг/м³, удельная теплопроводность 1,16 Вт/м·К; удельная теплоемкость 740 Дж/кг·К [12]. Толщину слоя при моделировании принимали равной 0,6 мм.

Анализ результатов исследования. Характер распределения температурного поля по сечению торца заготовки при отсутствии учета слоя окалины (а) и с ее учетом (б) приведен на рис. 5. Установлено, что разница между значениями температур составляет 10...20 °С.

В этой связи, в дальнейшем все расчеты выполнялись с использованием модели, которая учитывает наличие окалины на поверхности заготовки.

В результате численных экспериментов были получены температурные поля распределения на торцах заготовки для различных начальных условий. Обработку результатов осуществляли путем нахождения разницы между температурами в данной точке поперечного сечения торца заготовки и температурой нагрева t_n .

При этом наибольшее внимание было уделено областям металла, непосредственно расположенных рядом с осевым дефектом макроструктуры. Результаты обработки экспериментальных данных представляли в виде столбчатых диаграмм (рис. 6) для каждого из принятых условных диаметров осевого дефекта D.

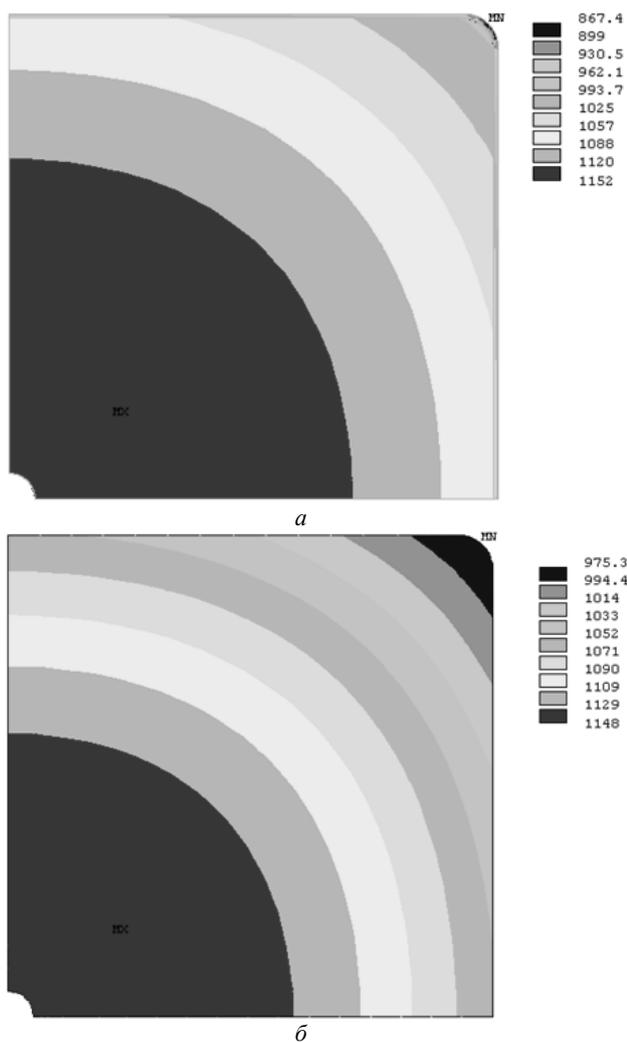


Рис. 5 – Температурне поле по сеченню торця заготовки: а – без учета слоя окалины и б – с окалиной толщиной 0,6 мм: начальная температура нагрева 1200°С

Анализ полученных результатов показал, что по мере снижения температуры нагрева наблюдается тенденция уменьшения величины температурного градиента. Установлено, что за время технологической выдержки 20 с снижение температуры торца заготовки составляет 45...60°С, за время 40 с – 60...80°С, а за время 60 с – 80...100°С. Данный факт служит прямым доказательством необходимости учета возникающих температурных градиентов в ходе дальнейшего моделирования (2-й этап) процесса вязкопластического деформирования заготовки в первых проходах обжимной клетки.

В тоже время, анализ полученных результатов с точки зрения возможного влияния наличия осевых дефектов на изменение характера температурного поля на торце заготовки показал, что какое-нибудь значимое влияние отсутствует. Наблюдаемый температурный градиент колеблется в пределах 10...15°С и локализуется в очень тонком слое металла, примыкающего к осевому дефекту. Кроме того, столь незначительные значения температурного градиента соизмеримы с погрешностью расчетов. В этой связи нет необходимости в дополнительном его учете на втором этапе исследований.

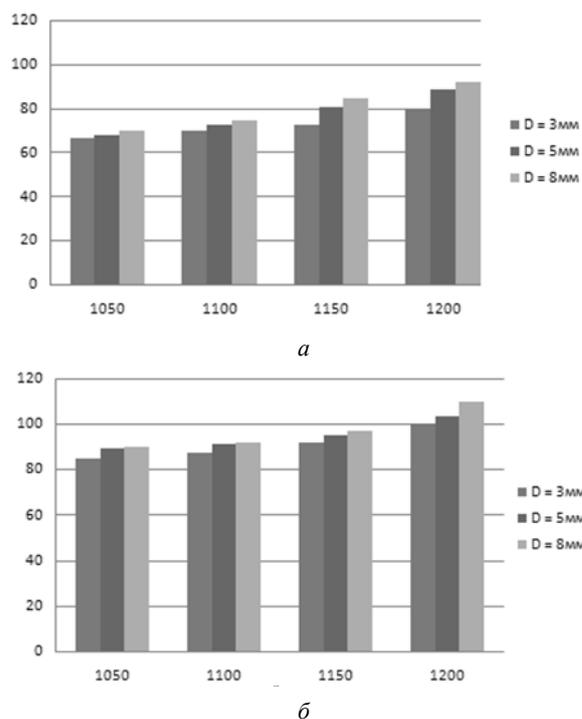


Рис. 6 – Диаграммы градиентов температуры металла на торце заготовки: время технологической выдержки: а – 40 с, б – 60 с

Исследование процесса прокатки проводили с помощью метода конечных элементов в трехмерной постановке. В качестве геометрической модели использовалась заготовка сечением 150x150 мм и длиной 200 мм из стали 60С2. Центральная несплошность представлялась в виде цилиндра диаметром 3, 5 и 8 мм. В качестве граничных условий использовалось тепловое поле, полученное на первом этапе исследования.

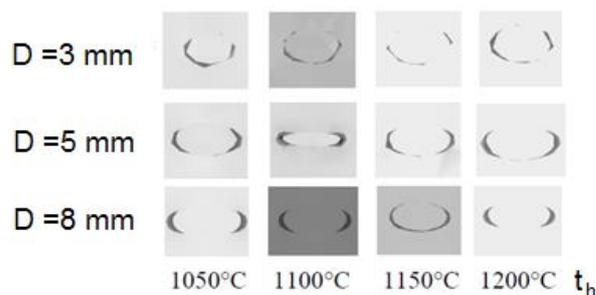


Рис. 7 – Размеры центральной несплошности после прокатки

Установлено что наиболее оптимальной температурой начала прокатки с точки зрения минимизации размеров центральной пористости в случае ее диаметра 3 и 5 мм является температура 1100°С, а при размере поры 8 мм – 1150°С.

Выводы. Представлены результаты промышленных исследований макроструктуры металла непрерывнолитой сортовой заготовки из конструкционных марок стали 45 и У7, а также ликвации химических элементов в её сечении. Установлено, что заготовкам текущего производства присуще достаточно высокое качество

макроструктури, однако качество осевой зоны непрерывнолитой заготовки имеет нестабильный характер. Разработана уточненная математическая модель оценки температурного состояния металла сортовой непрерывнолитой заготовки перед прокаткой на участке "нагревательная печь – обжимная клеть", отличительной особенностью которой является учет наличия окалины и визуально наблюдаемых дефектов литейного происхождения на ее торце. Показано, что не учёт наличия на ее поверхности слоя окалины приводит к заниженным, не менее чем 20°C, значениям температуры. Изменение времени технологической выдержки от 20 до 60 гарантирует рост градиента температуры на торце заготовки (центр – поверхность) с 45 до 100°C. В тоже время, наличие торцевых осевых дефектов вносит дополнительный градиент, величина которого соизмерима с погрешностью эксперимента, что в свою очередь не требует, в отличие от градиентов, вносимых временем технологической выдержки, их обязательного учета. Проведенное моделирование поведения осевой пористости во время прокатки позволило рекомендовать температуру нагрева заготовок с целью обеспечения наиболее благоприятных условий для сокращения размеров осевой несплошности.

Список литературы:1. *Jingxin S.* Effects of FC mold on slab and final product qualities at low throughputs / *S. Jingxin, Ya. Hongliang, L. Xianggui, J-E. Eriksson, H. Helmut* // *AISTech* 2010. – Pittsburgh, May 3–6, 2010: AIST Proceedings. – Vol. 2. – Warrendale (Pa): AIST. 2010. – С.63–70. 2. *Широких Т. А.* Применение технологии "мягкого" обжатия непрерывнолитой заготовки с целью подавления осевой пористости и ликвации / *Т. А. Широких, В. Г. Герасименко* // *Черная металлургия*. – 2011. – N1 – С.40–42. 3. *Kumar C. S.* Influence of modified casting practice on steel cleanliness / *C. S. Kumar* // *ISIJ Int.* – 2011. – N4. – С.557–565. 4. *Королев А. С.* Целесообразность вакуумирования конструкционных сталей в ЭСПЦ ОАО "ММК" / *А. С. Королев, В. Н. Селиванов* // *Энергетики и металлургии настоящего и будущего России: Материалы 11 Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и специалистов, Магнитогорск, 20–22 мая, 2010.* – Магнитогорск: МГТУ. – 2010. – С.74–76. 5. *Yavuz M. M.* Nozzle design for ArcelorMittal Dofasco's No. 1 continuous caster for minimizing sliver defects / *M. M. Yavuz, J. Sengupta* // *AISTech* 2010, Pittsburgh, Pa, May 3–6, 2010: AIST Proceedings. – Vol. 2. – Warrendale (Pa): AIST.

2010. – С.41–51. 6. Высокоэффективные технологические схемы и интеграция – основа повышения качества проката ответственного назначения / *А. А. Минаев, А. Н. Лубенец, Е. Н. Смирнов* [и др.] // *Металл и литье Украины*. – 2002. – №7–8. – С.35–37. 7. *Рудской А. И.* Теория и технология прокатного производства / *А. И. Рудской, В. А. Лунев*. – СПб. : Наука, 2008. – 527с. 8. *Исаев О. Б.* Влияние углерода и малых концентраций примесей цветных металлов на качество непрерывнолитой заготовки / *О. Б. Исаев* // *Металлург*. – 2009. – № 9. – С.69–72. 9. *Чижиков, Ю. М.* Прокатываемость стали и сплавов / *Ю. М. Чижиков*. – М. : Металлургия, 1961. – 451 с. 10. Развитие металлургического мини-завода ООО «Электросталь» и повышение его производительности / *А. Н. Смирнов, А. С. Хобта, А. И. Серов* [и др.] // *Сталь*. – 2011. – № 1. – С. 34–37. 11. Поведение дефектов макро- и микроструктуры непрерывнолитой заготовки при сортовой прокатке / *А. И. Рудской, В. А. Лунев, Е. Г. Щеголева* [и др.] // *Металлообработка*. 2006. – №4. – С.52–54. 12. Моделирование поведения оксидной окалины при горячей прокатке // *Новости чер. металлургии за рубежом*. – 2002. – №3. – С.84–86.

Bibliography (transliterated): 1. *Jingxin, S., Ya. Hongliang, L. Xianggui, J-E. Eriksson, and H. Helmut.* «Effects of FC mold on slab and final product qualities at low throughputs.» *AIST Proceedings* 2(2010):63–70. Print. 2. *Shirokih, T. A., and V. G. Gerasimenko.* «Primenenie tehnologii "mjagkogo" obzhatija nepreryvnolitoj zagotovki s cel'ju podavlenija osevoj poristosti i likvacii.» *Chernaja metallurgija* 1(2011):40–42. Print. 3. *Kumar, C. S.* «Influence of modified casting practice on steel» *ISIJ Int.* 4(2011):557–565. Print. 4. *Korolev, A. S., and V. N. Selivanov.* «Celesoobraznost' vakuumirovanija konstrukcionnyh stalej v JeSPC OAO «MМК». *Jenergetiki i metallurгии nastojashemu i budushhemu Rossii: Materialy 11 Vserossijskoj nauchno–tehničkoj konferencii studentov, aspirantov i specialistov* (2010):74–76. Print. 5. *Yavuz, M. M., and J. Sengupta* «Nozzle design for ArcelorMittal Dofasco's No. 1 continuous caster for minimizing sliver defects» *AIST Proceedings* 2(2010):41–51. Print. 6. *Minaev, A. A., A. N. Lubenev, E. N. Smirnov, and other* «Vysokoeffektivnye tehnologičeskie shemy i integracija – osnova povyšeniya kachestva prokata otvetstvennogo naznachenija.» *Metall i lit'je Ukrainy* 7-8(2002):35–37. Print. 7. *Rudskoj, A. I., and V. A. Lunev.* *Teorija i tehnologija prokatnogo proizvodstva.* Saint Petersburg: Nauka, 2008. Print. 8. *Isaev, O. B.* «Vlijanie ugleroda i malyh koncentracij primesej cvetnyh metallov na kachestvo nepreryvnolitoj zagotovki.» *Metallurg* 9(2009):69–72. Print. 9. *Chizhikov, Ju. M.* *Prokatyvajemost' stali i splavov.* Moscow: Metallurgizdat, 1961. Print. 10. *Smirnov, A. N., A. S. Hobta, A. I. Serov, and other.* «Razvitie metallurgičeskogo mini-zavoda OOO «Jelektrostal'» i povyšenie ego proizvoditel'nosti» *Stal'* 1(2011): 34–37. Print. 11. *Rudskoj, A. I., V. A. Lunjev, E. G. Shhegoleva, and other.* *Povedenie defektov makro- i mikrostrukturny nepreryvnolitoj zagotovki pri sortovoj prokatke.* *Metallroobrabotka* 4(2006):52–54. Print. 12. «Modelirovanie povedeniya oksidnoj okaliny pri gorjachej prokatke.» *Novosti cher. metallurgii za rubezhom.* 3(2002):84–86. Print.

Поступила (received) 02.11.2015

Сведения об авторах / About the Authors

Смирнов Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор, Старооскольский технологический институт (филиал) НИТУ МИСиС, профессор, +7(980) 388-74-89, en_smirnov@i.ua.

Smyrnov Yevgen, Dr. of Engineering Science, Professor, Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) NUST «MISIS», Professor, +7(980) 388-74-89, en_smirnov@i.ua.

Серов Александр Иванович, ПАО «Донецкий металлпрокатный завод», начальник технического отдела.

Serov Alexander, OJSC "Donetsk Metal Rolling Plant", Head of Technical Department.

Скляр Виталий Александрович, кандидат технических наук, доцент, Старооскольский технологический институт (филиал) НИТУ МИСиС, доцент, +7(980) 387-17-24, konfor1@yandex.ru.

Skliar Vitalii, PhD, docent, Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) NUST «MISIS», Associate professor, +7(980) 387-17-24, konfor1@yandex.ru.

Домбровский Евгений Олегович, ПАО «Енакиевский металлургический завод», инженер технического отдела.

Dombrovsky Yevgen, PJSC «Yenakieve steel», engineer of technical department.

Смирнов Олег Евгеньевич, Донецкий национальный технический университет, магистр.

Smyrnov Oleg, Donetsk National Technical University, masters-student.