

УДК 621.74.047:669.017.16

Смирнов Е. Н.  
Серов А. И.  
Галухина И. Н.  
Базарова Г. С.  
Домбровский Е. О.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ СОРТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАРОК СТАЛИ И ХАРАКТЕРА ЛИКВАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Использование современных технологических схем – условие для создания инновационного продукта. Концепция минимальной металлоемкости конструкции готового изделия в совокупности с оптимизированными затратами одной тонны используемого металлопроката востребованного потребителем качества предьявляет все более высокий комплекс требований к стали как конструкционному материалу.

Произошедший за последние годы прирост объемов производства сортового проката из непрерывнолитой заготовки [1], во многом способствовал решению поставленной задачи. Вместе с тем 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.

Если проанализировать тенденцию строительства сортовых прокатных станов для производства конструкционных и специальных сталей за последние десять лет, то с уверенностью можно утверждать, что начиная с пуска установки «ABS» Luna (Италия) [2] на всех из них реализован процесс низкотемпературной прокатки (LTR- процесс) [3–5]. При этом особо подчеркивается, что исходное качество непрерывнолитой заготовки и температура прокатки, как один из трех базовых параметров, в наибольшей степени влияют на все стадии измельчения зерна в процессе обработки горячего металла давлением.

Процесс измельчения зерна может подразделяться на разные стадии, хотя несколько стадий могут протекать одновременно. Первоначальная деформация зерна имеет тенденцию к увеличению плотности дислокаций, делая возможным формирование новых межзеренных границ. Аннигиляция и восстановление новых межзеренных границ строго привязаны к фактической температуре, и формирование и рост новых зерен представляют собой термодинамический процесс. На разных стадиях происходят восстановление, статическая рекристаллизация и динамическая рекристаллизация, которые влияют на изменение пластического течения. Наконец, рост зерна происходит как тенденция минимизации энергии межзеренных границ [6]. Как уже было описано в различных известных теоретических моделях для разных химических составов стали, критическая температура определяет лимит между состоянием измельчения зерна и полностью рекристаллизованной структурой роста зерна. Как только уменьшится содержание углерода, эффект проявляется более четко.

В свете вышеизложенного, для конструкционных сталей, а также сталей специального назначения принципиально важно поддерживать требуемую температуру по всему сечению проката, а также иметь в исходной непрерывнолитой заготовке минимальный уровень ликвации химических элементов. Невыполнение вышеназванных условий, может привести к образованию неоднородной конечной структуры с точки зрения размера зерна и фаз.

Как подчеркивается в работе [7], наблюдаемый рост требований к служебным свойствам стали целого ряда классов фактически предопределил основные направления улучшения технологии производства непрерывнолитой сортовой заготовки:

- стабильность химического состава стали и макроструктуры по сечению непрерывнолитого слитка [8–11];
- снижение содержания вредных примесей [12–15];
- снижение количества «опасных» неметаллических включений и минимизация поверхностных дефектов [16–18].

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 [19], невозможно без комплексного предварительного исследования качества металлопродукции на каждом из этапов вновь созданной технологической схемы.

Целью настоящих исследований являлась оценка качества макроструктуры и характера ликвации химических элементов по сечению непрерывнолитой сортовой заготовки из конструкционных марок стали.

Электросталеплавильный комплекс ООО «Электросталь» имеет в своем составе 50-тонную высокопроизводительную ДСП, установку ковш-печь и 3-х ручьевую сортовую МНЛЗ [20]. Первоначально согласно проекту предусматривалась разливка стали в кристаллизатор сечением 125 × 125 мм и 135 × 135 мм открытой струей. Между тем сформировавшаяся в последнее время потребность в расширении марочного сортамента качественных углеродистых и легированных марок стали (преимущественно для потребностей машиностроения) обусловила необходимость как в реализации технологии полной защиты струи металла от вторичного окисления на участке «стальковш – кристаллизатор», так и в расширении сортамента отливаемой заготовки до сечения 150 × 150 мм.

В контексте всего вышеизложенного в качестве объекта исследования была выбрана непрерывнолитая заготовка, отлитая через трёх плитный шиберный затвор с полной защитой струи от вторичного окисления на участке «стальковш – кристаллизатор». На первом этапе исследования ограничили двумя марками стали:

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

Химический состав стали исследуемых плавков приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали исследуемых плавков непрерывнолитой заготовки

Марка стали	Сечение заготовки, мм	Содержание элементов, %							
		C	Mn	S	Si	P	G	Cu	Al
Сталь 45	130x130	0,45	0,720	0,21	0,022	0,016	0,08	0,18	0,0049
Сталь У7 (плавка 1)	125x125	0,68	0,305	0,26	0,012	0,011	0,09	0,22	0,0044
Сталь У7 (плавка 2)	125x125	0,67	0,296	0,24	0,018	0,010	0,08	0,21	0,0067

Исследование особенностей макроструктуры непрерывнолитых сортовых заготовок и распределения химических элементов в их поперечном сечении проводили на пробах отобранных как на предприятии изготовителе заготовки, так и на предприятии потребителе последней. При этом на предприятии изготовителе непрерывнолитой заготовки отбор проб производили по ходу разливки 20 и 70 % массы металла плавки. Из каждой отобранной

пробы изготавливались поперечные темплеты для оценки макроструктуры заготовки по СОУ МПП 77.040-199:2007, а также продольные темплеты – для исследования характера ликвации химических элементов в поперечном и продольном направлениях. В свою очередь, на предприятии потребителя выборочно от каждой исследуемой плавки отбирались пробы и изготавливались поперечные темплеты для оценки макроструктуры заготовки по СОУ МПП 77.040-199:2007. В дальнейшем, с использованием полученных поперечных темплетов исследовалась также ликвация химических элементов. Пробы для изготовления темплетов на обоих предприятиях получали огневой вырезкой с соблюдением требований ГОСТ 7564-73.

Выявление макроструктуры осуществляли путём горячего травления в 50 % растворе соляной кислоты при температуре 80 °С. Вид макроструктуры непрерывнолитых заготовок представлен на рис. 1.

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. 2. Анализ приведенных в табл. 2 данных позволяет говорить о достаточно высоком качестве полученной непрерывнолитой заготовки. Вместе с тем, имеющиеся различия в данных которые были получены на предприятии изготовителе и потребителе, потребовали дополнительных исследований по выявлению причин, повлекших за собой выявленные различия.

В рамках программы расширенных исследований была изготовлена серия продольных темплетов из тех же штанг заготовок, из которых ранее были отобраны пробы для изготовления поперечных темплетов (рис. 2). Анализ макроструктуры металла на продольных темплетах показал, что качество осевой зоны непрерывнолитой заготовки имеет нестабильный характер. В этом случае балл осевой пористости и осевой ликвации во многом предопределяется местом вырезки темплета и, что естественно, может иметь достаточно широкий диапазон колебаний. В рассматриваемом случае ширина диапазона колебаний составила 1,56 алла. Однако следует особо отметить, что имеющиеся колебания имели место в первой половине шкалы (0–2 балл), используемой для описания макроструктуры заготовки имеющей достаточно хорошее качество [21].

В рамках второго этапа исследований оценивалась ликвация 4-х химических элементов (С, Мn, Si, S) в поперечном сечении квадратной заготовки вдоль одной из осей симметрии, а также в центральной области вдоль продольной оси симметрии. Схема вырезки образцов приведена на рис. 1 и 2. Содержание химических элементов определяли с помощью оптических электронных спектрометров SPECTROLAB LAB LAV M10 и SPECTROLAB LAB LAVECO1A (изготовитель SPECTRO Analytical Instruments GmbH&Co.KG, Германия) по ГОСТ 18895-97. В дальнейшем, по аналогии с подходом, изложенным в работе [22], определяли индекс ликвации элементов как отношение содержания химического элемента в точке контроля к содержанию элемента в жидкой стали (данные последнего анализа на установке «печь-ковш»). Результаты обработки экспериментальных данных о ликвации химических элементов представлены на рис. 3.

Анализ приведенных данных показывает, что для стали У7 наиболее ликвидирующими элементами следует считать Si (индекс ликвации  $K_{Si}^1 = 1,077...1,115$  и  $K_{Si}^2 = 1,083...1,125$  для плавки 1 и 2 соответственно) и S (индекс ликвации  $K_S^1 = 0,75...1,833$  и  $K_S^2 = 0,722...0,833$ ). При этом следует отметить, что индекс ликвации Si имеет положительный сдвиг, а S – отрицательный сдвиг относительно единичного значения. Ликвация С и Мn выражена в меньшей степени для металла плавки 1 (практически один уровень числовых значений). В случае же плавки 2, наблюдается больший интервал разброса значений  $K_C$  и  $K_{Mn}$ . При этом индекс ликвации углерода  $K_C$  по мере приближения к центру меняет направление сдвига с положительного на отрицательное. Выявленная динамика изменения индекса ликвации углерода  $K_C$  хорошо коррелирует с результатами, приведенными в работе [22].

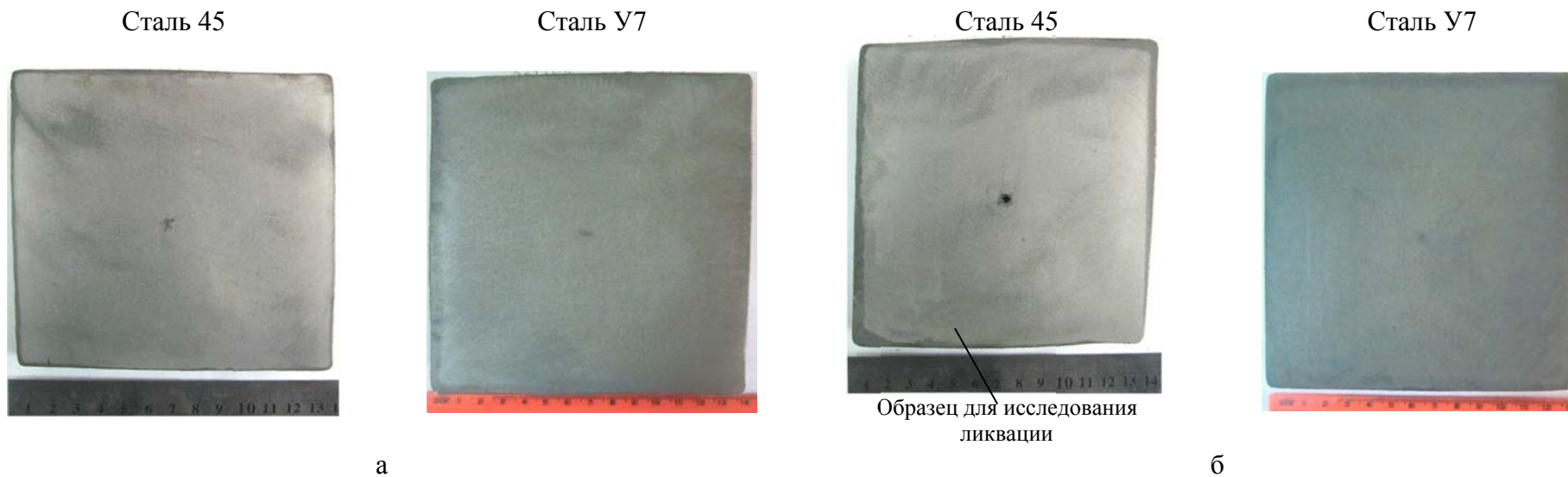


Рис. 1. Макроструктура непрерывнолитой заготовки сечением  $130 \times 130$  мм из стали 45 и сечением  $125 \times 125$  из стали У7, ( $\times 0,5$ ): а – 20 % от массы разливаемой плавки; б – 70 % от массы разливаемой плавки

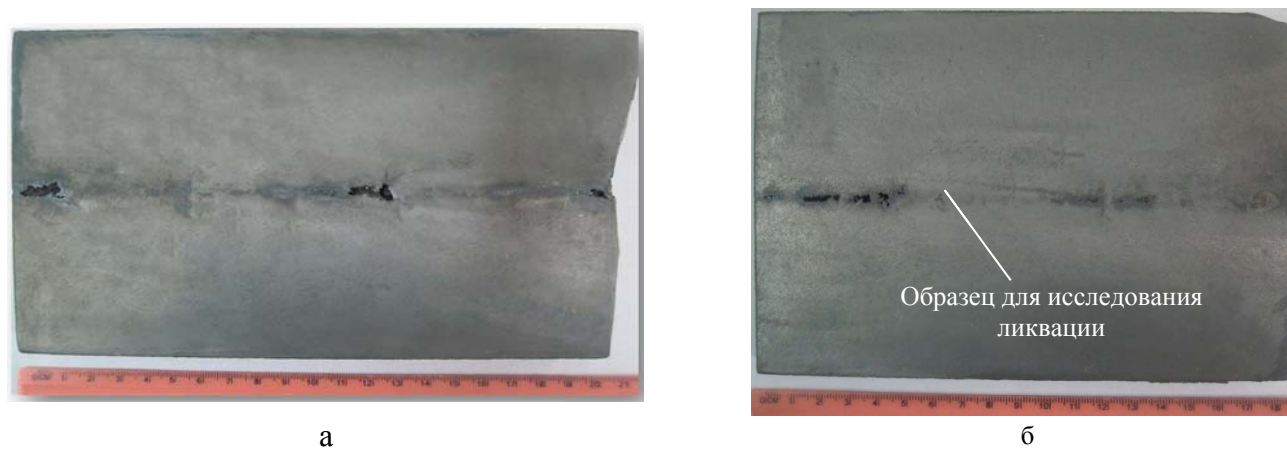


Рис. 2. Макроструктура непрерывнолитой заготовки (продольный темплет) сечением  $130 \times 130$  мм из стали 45, ( $\times 0,5$ ): а – 20 % от массы разливаемой плавки; б – 70 % от массы разливаемой плавки

Таблица 2

Параметры макроструктуры непрерывнолитой заготовки сечением 125 × 125 мм из стали У7 (согласно СОУ МПП.77.040-199:2007)

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

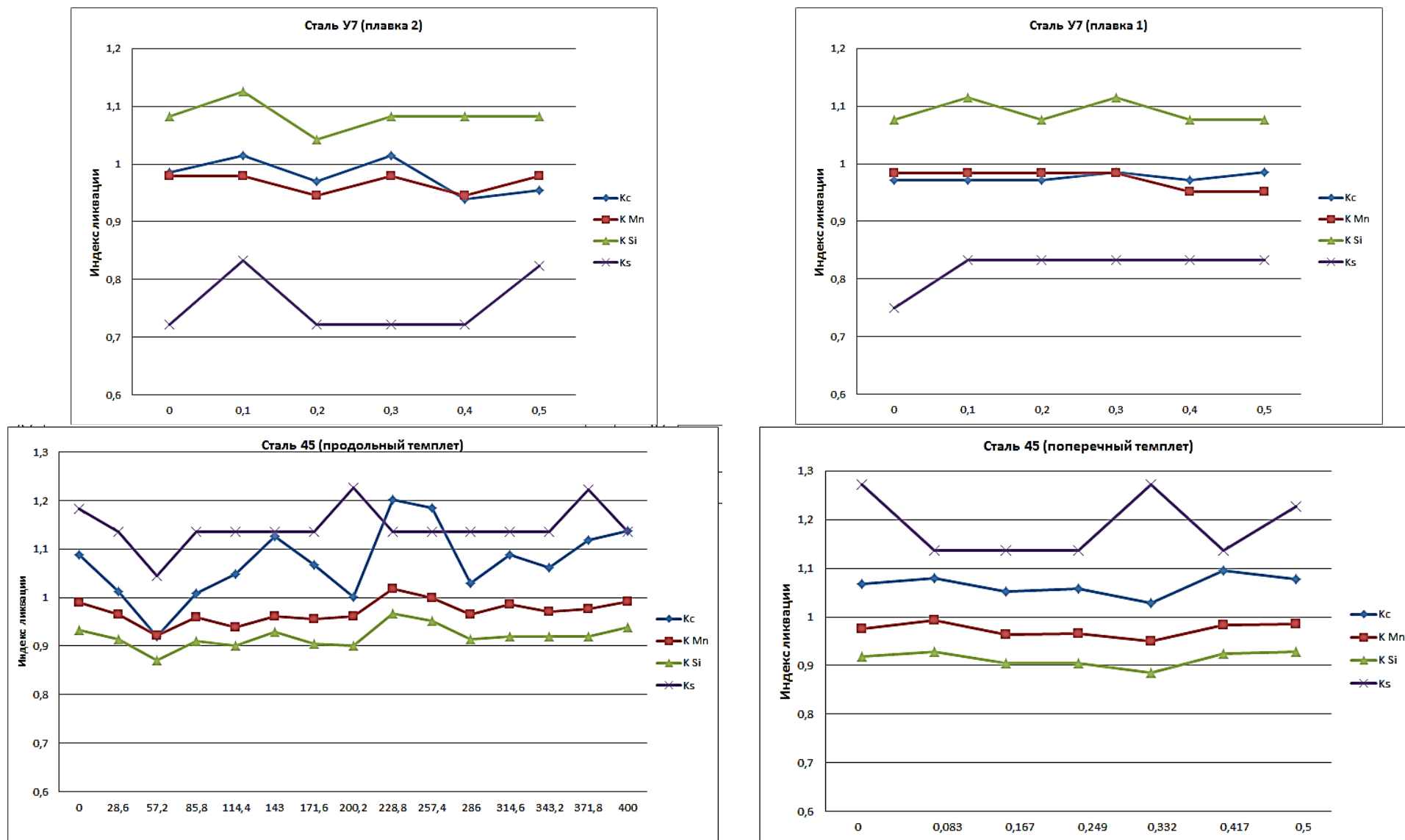


Рис. 3. Динамика изменения индекса ликвации химических элементов в поперечном и продольном сечениях непрерывнолитой заготовки

Применительно к условиям стали 45 также наиболее сильно ликвирующими элементами следует считать Si (индекс ликвации  $K_{Si} = 0,886...0,929$ ) и S (индекс ликвации  $K_S = 1,136...1,273$ ). При этом в отличие от стали У7, наблюдается обратная картина, а именно: ликвация S имеет положительный сдвиг от единичного уровня, а ликвация Si – отрицательный. Также, как и в случае стали У7, ликвация Mn имеет минимальный характер. Ликвация углерода несколько больше, чем случае стали У7 ( $K_C = 1,029...1,096$ ) и имеет положительный сдвиг.

Анализ динамики изменения индексов ликвации в осевой области по продольной в темплете (рис. 3) показывает, что, в целом, качественный характер не изменяется: ликвация Mn и Si практически постоянна ( $K_{Mn} = 0,921...1,0$  и  $K_{Si} = 0,871...0,967$ ). Несколько большей является ликвация S ( $K_S = 1,045...1,227$ ). За исключением трех выпадов, можно считать, что ликвация S практически одинаковая по всей длине исследуемого образца и находится на уровне  $K_S = 1,136...1,182$ .

Наибольшего внимания заслуживает ликвация C. В целом, вдоль длины исследованного образца наблюдается существенное колебание величины  $K_C$ . Диапазон колебания составляет  $K_C = 0,920...1,202$ . При этом за исключением одной точки, во всех остальных случаях она имеет положительный сдвиг. Среднее значение  $\overline{K_C}$  по 15-ти точкам замера составило  $\overline{K_C} = 1,073$ . Столь высокое среднее значение индекса ликвации углерода  $K_C$ , а главное ширина интервала его колебаний позволяет говорить о необходимости реализации в линии МНЛЗ технологических приемов внешнего воздействия на кристаллизирующийся металл, позволяющих минимизировать ликвацию химических элементов, а, следовательно, и повысить уровень качества готового металлопроката (однородность микроструктуры, стабильность механических свойств и т. д.).

## 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 макроструктуры. В то же время, выполненная оценка ликвации химических элементов показала, что основным химическим элементам (C, Si, Mn и S) свойственны достаточно высокие индексы. Анализ индекса ликвации C в осевой зоне заготовки (продольный темплет) показывает, что величина среднего значения  $\overline{K_C} = 1,073$  и интервал варьирования ( $K_C = 0,920...1,202$ ) являются крайне высокими. Выявленные особенности ликвации химических элементов позволяют говорить о необходимости реализации в линии МНЛЗ технологических приемов внешнего воздействия на кристаллизирующийся металл, позволяющих минимизировать ликвацию химических элементов, а, следовательно, и повысить уровень качества готового металлопроката.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *World steel demand will grow to reach a record 1340 million ton // Stahl und Eisen.* – 2010. – № 11. – P. 2–4.
2. Грейс П. *Новаторские технологии в производстве длинномерной и листовой продукции / П. Грейс, Р. Штайн-Верзен // Черные металлы.* – 2001. – Ноябрь. – С. 22–29.
3. Masini R. *Latest bar mill technology / R. Masini, A. Lainati // Millennium Steel.* – 2005. – S. 216–221.
4. Массини Р. *Технология калибровки сортового проката в многокалиберных двухвалковых клетях в комбинации с термомеханической обработкой / Р. Массини // Steel Times International.* – 2005. – № 14. – С. 18–23.
5. Tosini R. *New stainless and specialty steel long products mini-mill for Baosteel / R. Tosini, F. Toshi, G. Salvador // Millennium Steel.* – 2007. – S. 122–127.
6. Jung Kyung-Hwan. *Numerical prediction of austenite grain size in a bar rolling process using an evolution model based on a hot compression test / Jung Kyung-Hwan, Lee Ho Won, Im Yong-Taek // Mater. Sci. and Eng.* – 2009, 519. – N 1–2. – P. 94–104.
7. *Ключевые направления развития металлургической технологии по обеспечению растущих требований к качеству стали / Е. Х. Шахпазов, А. И. Зайцев, И. Г. Родионова, Г. В. Семернин // Электromеталлургия.* – 2011. – № 2. – С. 2–12.

8. A CONCAST billet caster and electromagnetic stirring of the melt / K. Stransky, F. Kavicka, B. Sekanina et al. // *Prace IMZ.* – 2009. – № 5. – С. 142–145.
9. Effects of FC mold on slab and final product qualities at low throughputs / Song Jingxin, Yang Hongliang, Leng Xianggui, Eriksson Jan-Erik, Hackl Helmut // *AISTech 2010, Pittsburgh, Pa, May 3–6, 2010 : AIST Proceedings.* – Vol. 2. – Warrendale (Pa) : AIST, 2010. – P. 63–70.
10. Сотников А. А. Системы мягкого обжатия на МНЛЗ и их влияние на качество макроструктуры заготовок / А. А. Сотников, С. В. Терлецкий, В. А. Марушкевич // *Сталь.* – 2011. – № 2. – С. 17–19, 112.
11. 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. – № 1. – С. 40–42.
12. Kumar, Choudhary Shiv. Influence of modified casting practice on steel cleanliness / Choudhary Shiv Kumar // *ISIJ Int.* – 2011, 51. – N 4. – S. 557–565.
13. Королев А. С. Целесообразность вакуумирования конструкционных сталей в ЭСПЦ ОАО «ММК» / А. С. Королев, В. Н. Селиванов // *Энергетики и металлурги настоящему и будущему России : материалы 11 Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и специалистов, Магнитогорск, 20–22 мая, 2010.* – Магнитогорск : МГТУ, 2010. – С. 74–76.
14. Нохрина О. И. К вопросу использования карбоната для микролегирования стали / О. И. Нохрина, В. И. Дмитриенко, И. Д. Рожихина, М. А. Платонов // *Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы 14 Международной конференции, Челябинск, 2010.* – Челябинск : ЮУрГУ, 2010. – Ч. 2. – С. 60–64.
15. Носов Ю. Н. Освоение производства стали 20Ю с разливкой на сортовой МНЛЗ / Ю. Н. Носов, Д. Б. Фойгт, И. Н. Сидорова // *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : труды Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 6–9 окт., 2009.* – Новокузнецк : СибГИУ, 2009. – С. 239–244.
16. 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.* – Warrendale (Pa) : AIST, 2010. – Vol. 2. – P. 41–51, 11.
17. Optimization of a submerged entry nozzle design to reduce non-metallic inclusions in line pipe steel / Forman Bruce R., Yavuz Mehmet M., Tsai Tomas H., Thacker Jeff A. // *AISTech 2010, Pittsburgh, Pa, May 3–6, 2010 : AIST Proceedings.* – Warrendale (Pa) : AIST, 2010. – Vol. 2. – P. 53–62.
18. Освоение технологии выплавки рельсовой стали низкотемпературной надежности с пониженным содержанием водорода / Л. А. Годик, Н. А. Козырев, З. А. Гизатулин и др. // *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : труды Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 26–28 окт., 2010.* – Новокузнецк : СибГИУ, 2010. – С. 66–69.
19. Высокоэффективные технологические схемы и интеграция – основа повышения качества проката ответственного назначения / [А. А. Минаев, А. Н. Лубенец, Е. Н. Смирнов и др.] // *Металл и литьё Украины.* – 2002. – № 7–8. – С. 35–37.
20. 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.
21. Поведение дефектов макро- и микроструктуры непрерывнолитой заготовки при сортовой прокатке / [А. И. Рудской, В. А. Лунёв, Е. Г. Щеголева и др.] // *Металлообработка.* – 2006. – № 4. – С. 52–54.
22. SMART/ASTC dynamic soft reduction technology and its application on bloom continuous caster at Pangang / Guijun Li, Kaijian Zhang, Yong Chen and i.t.c // *Journal of University of Science and Technology.* – Beijing. – 2006, April. – Volume 13. – № 2. – P. 1–4.

Смирнов Е. Н. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;  
Серов А. И. – нач. тех. отдела ПАО «ДМПЗ»;  
Галухина И. Н. – аспирант ДонНТУ;  
Базарова Г. С. – инж. I кат. тех. отдела ПАО «ДМПЗ»;  
Домбровский Е. О. – инж. I кат. тех. отдела ПАО «ДМПЗ».

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

ПАО «ДМПЗ» – Публичное акционерное общество «Донецкий металлопрокатный завод», г. Донецк.

E-mail: smirnov@fizmet.dgtu.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 11.10.2012 г.