

УДК 621.74.047

О РАЦИОНАЛЬНОЙ ДЛИНЕ ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УЗКИХ ГРАНЕЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЫПУКЛОСТИ

Шевченко Е.А.¹, аспирант кафедры металлургии черных металлов (nfmisis-nis@yandex.ru)

Столяров А.М.¹, профессор кафедры металлургии черных металлов

Шаповалов А.Н.², к.т.н., доцент кафедры металлургических технологий

Баранчиков К.В.³, начальник лаборатории непрерывной разливки

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

(455000, Россия, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Новотроицкий филиал

(426359, Россия, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, д. 8)

³ ОАО «Уральская Сталь»

(462356, Россия, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Заводская, д. 1)

Аннотация. Актуальной задачей для ОАО «Уральская сталь» является определение рациональной длины поддерживающей системы на раме кристаллизатора для предотвращения образования выпуклости узких граней слывов с размерами поперечного сечения 270×1200 мм. Для решения этой задачи использована методика, основанная на сравнении прочности затвердевшей корочки узкой грани заготовки в различных точках длины отливаемого слыва и расчетного значения распирающего давления жидкого металла на корочку. Прочность затвердевшей корочки слыва в условиях возможности пластической деформации оболочки может характеризоваться условным пределом текучести разливаемой стали. Экспериментальное определение условного предела текучести литой стали 09Г2С, 15ХСНД и Ст3сп проведено на высоко-температурной установке Zwick/Roell Z1600H в интервале температур 900 – 1400 °С. Величина распирающего давления жидкого металла, воздействующего на затвердевшую корочку слыва, рассчитана по разработанной методике, позволяющей учитывать конкретные условия разливки для рассматриваемой МНЛЗ. При сравнении величин экспериментальных и расчетных параметров установлено, что затвердевшая корочка узкой грани слыва толщиной 270 мм начинает выдерживать распирающее давление расплава на удалении от зеркала металла, равном 1610 мм. С учетом высоты металла в кристаллизаторе (около 800 мм) длина поддерживающей системы узких граней заготовки должна составлять 810 мм. Это возможно в том случае, если количество поддерживающих роликов диаметром 130 мм для каждой стороны заготовки будет увеличено с четырех до пяти. В результате исследований определена рациональная протяженность поддерживающей системы, расположенной на раме кристаллизатора, для предотвращения образования выпуклости узких граней слывовой заготовки с размерами поперечного сечения 270×1200 мм в условиях ОАО «Уральская Сталь».

Ключевые слова: непрерывнолитой слыв, узкие грани, выпуклость, рама кристаллизатора, поддерживающая система, рациональная длина.

В ОАО «Уральская Сталь» слывовая непрерывнолитая заготовка шириной 1200 мм и толщиной 190 или 270 мм отливается на одноручевой машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) фирмы SMS Demag. Машина криволинейного типа с вертикальным участком имеет базовый радиус 10,5 м и металлургическую длину 30,3 м. На выходе из кристаллизатора высотой 900 мм слывовая заготовка со всех сторон поддерживается роликами, закрепленными на раме кристаллизатора и расположенными в один ряд. Значительная часть слывов толщиной 270 мм, вытягиваемых со средней скоростью 0,9 м/мин, имела выпуклость узких граней величиной до 12 мм, в то время как на заготовках толщиной 190 мм при скорости вытягивания 1,25 м/мин этот дефект отсутствовал. В ранее проведенных исследованиях [1 – 5] установлена тесная взаимосвязь между выпуклостью узких граней слыва и степенью развития внутренних и поверхностных дефектов как отлитой заготовки, так и прокатанного из него толстого горячекатаного листа. В дальнейшем поддерживающая система узких граней слывов была модернизирована путем увеличения количества роликов для каждой стороны с одного до четырех. Это позволило примерно вдвое уменьшить

величину выпуклости узких граней слывовой заготовки толщиной 270 мм, но не привело к устранению данного дефекта полностью. Поэтому актуальной задачей стало определение рациональной длины поддерживающей системы на раме кристаллизатора для предотвращения образования выпуклости узких граней слывов с размерами поперечного сечения 270×1200 мм.

Для решения поставленной задачи использована методика, основанная на сравнении прочности затвердевшей корочки узкой грани заготовки в различных точках длины отливаемого слыва и расчетного значения распирающего давления жидкого металла на корочку [6]. В результате такого сравнения можно определить точку на технологическом канале МНЛЗ, в которой вышеназванные параметры будут иметь одинаковые значения. Следовательно для предотвращения образования выпуклости на участке от выхода из кристаллизатора до установленной точки необходимо осуществлять роликковую поддержку узких граней отливаемой заготовки.

Прочность затвердевшей корочки слыва в условиях возможности пластической деформации оболочки (без образования трещин) может характеризоваться

условным пределом текучести разливаемой стали. Величина этого параметра зависит как от химического состава металла, так и температуры затвердевшей корочки поверхностного слоя слябовой заготовки, которая должна определяться как средняя величина между температурой поверхности слябовой заготовки и температурой ликвидус разливаемой стали. Поиск значений условного предела текучести металла различного химического состава может осуществляться по справочным данным [7, 8]. Однако эти данные редки и не всегда достоверны из-за трудностей с определением механических свойств металла в высокотемпературной области. Поэтому в ОАО «Уральская Сталь» проведено специальное исследование механических свойств металла поверхностного слоя непрерывнолитой слябовой заготовки [9, 10]. Образцы литой стали наиболее распространенных марок 09Г2С, 15ХСНД и СтЗсп вырезались из узких граней слябовых темплетов. Механические свойства металла 36 образцов определялись на высокотемпературной установке Zwick/Roell Z1600H. Изменение значений условного предела текучести металла разного состава под влиянием температуры показано на рис. 1.

При проведении расчетов для верхней части лунки жидкого металла наибольший интерес представляет прочность металла при температуре 1200–1400 °С. Зависимость условного предела текучести металла (σ_T , кПа) от температуры (t , °С) в вышеназванном диапазоне аппроксимируется следующими уравнениями:

Сталь	Уравнение регрессии
09Г2С	$\sigma_T = 0,011705t^2 - 35,433t + 27\,737;$ (1)
15ХСНД	$\sigma_T = 0,013685t^2 - 41,10t + 31\,793;$ (2)
СтЗсп	$\sigma_T = 0,010205t^2 - 31,583t + 25\,227.$ (3)

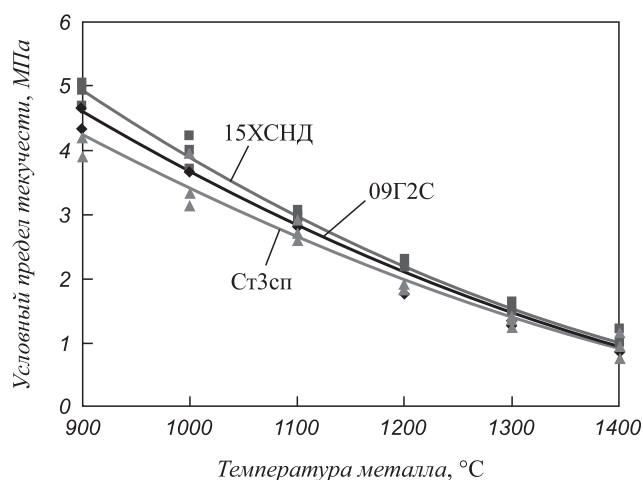


Рис. 1. Изменение условного предела текучести литого металла разного химического состава от температуры

Fig. 1. Changes in yield strength of cast metal with various chemical composition from the temperature

Высокие значения корреляционного отношения (более 0,95) свидетельствуют о статистической значимости полученных зависимостей.

Из рис. 1 видно, что при самой высокой температуре испытаний 1400 °С предел текучести стали всех трех марок примерно одинаков. С понижением температуры до 900 °С различия в значениях условного предела текучести металла все более возрастают. Более высокая прочность стали 15ХСНД и 09Г2С обусловлена наличием в металле легирующих элементов. Меньшую прочность имеет сталь СтЗсп, поэтому определение рациональной протяженности поддерживающей системы узких граней сляба необходимо производить для условий отливки данной марки углеродистой стали.

Для оценки динамики условного предела текучести металла затвердевшей корочки по длине отливаемого сляба можно использовать полученное ранее уравнение регрессии (3). Как уже отмечалось ранее, в этом уравнении температура металла должна находиться как среднее значение между температурой поверхности узкой грани слябовой заготовки и температурой ликвидус разливаемой стали. Расчетные значения температуры ликвидус стали СтЗсп изменяются в интервале 1515–1518 °С. При повышении температуры ликвидус увеличивается температура затвердевшей корочки, что вызывает снижение ее прочности (см. рис. 1). Поэтому для расчета было выбрано наибольшее значение температуры ликвидус, равное 1518 °С. Температура поверхности центра узкой грани слябовой заготовки определялась согласно зависимости, полученной эмпирическим путем. Для этого в шести точках технологического канала МНЛЗ при разливке стали СтЗсп, 09Г2С и 15ХСНД десяти плавков было произведено около 180 измерений температуры поверхности узкой грани слябовой заготовки при помощи тепловизора FLIR T640. Усредненные по плавкам результаты измерений температуры металла представлены на рис. 2.

Уравнение регрессии (см. рис. 2), описывающее изменение температуры поверхности в центре узкой грани сляба ($t_{\text{пов } i}$, °С) по длине отлитой заготовки (l_i , мм) имеет следующий вид:

$$t_{\text{пов } i} = 1968l_i^{-0,0761}, \quad \eta = 0,964. \quad (4)$$

По уравнениям (3) и (4) возможно построение графика изменения условного предела текучести затвердевшей корочки из стали СтЗсп по длине отливаемого сляба.

Как уже отмечалось ранее, согласно разработанной методике прочность корочки затвердевшего металла должна сравниваться с внутренним давлением расплава на корочку. Величину распирающего давления жидкого металла, воздействующего на затвердевшую корочку сляба, можно определить по формуле

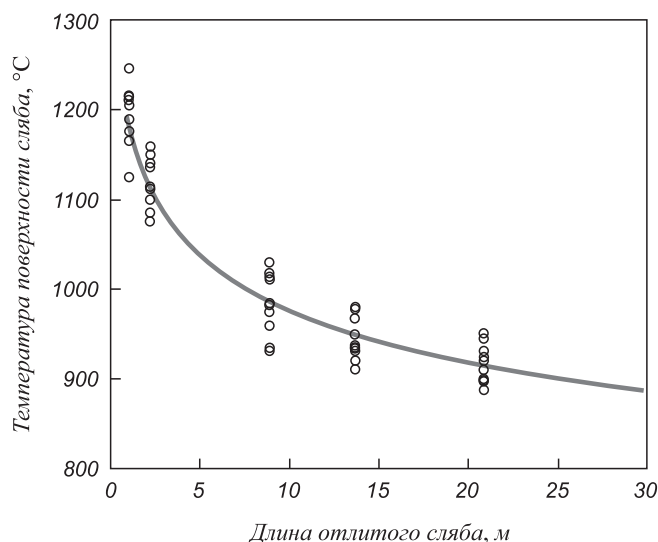


Рис. 2. Изменение усредненной температуры поверхности узкой грани слябов по длине отливаемой заготовки

Fig. 2. Changes in the average surface temperature of the narrow side of the slabs along the length of the cast billet

$$P_{\text{расп}_i} = \frac{\rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}_i} g a_i}{4 b_i \xi_i^2}, \quad (5)$$

где $P_{\text{расп}_i}$ – распирающее давление жидкого металла на затвердевшую корочку в центре узкой грани сляба в i -й момент времени, кПа; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкого металла, т/м³; $V_{\text{ж}_i}$ – объем лунки жидкого металла в i -й момент времени, м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; a_i , b_i – размеры лунки жидкого металла в поперечном сечении сляба по толщине и ширине заготовки в i -й момент времени, м; ξ_i – толщина затвердевшей корочки сляба в i -й момент времени, м.

В уравнении (5) присутствует параметр, характеризующий объем лунки жидкого металла в требуемый момент времени. С некоторым упрощением верхняя часть лунки жидкого металла в слябе на вертикальном участке рассматриваемой МНЛЗ может быть представлена в виде перевернутой усеченной четырехгранной пирамиды. Объем такой геометрической фигуры находится из уравнения [11]

$$V_{\text{ж}_i} = \frac{h_i}{6} [a_o b_o + (a_o + a_i)(b_o + b_i) + a_i b_i], \quad (6)$$

где h_i – высота столба жидкого металла в i -й момент времени, м; a_o , b_o – размеры зеркала металла по узкой и широкой граням кристаллизатора соответственно, м.

Размеры зеркала металла в верхней части лунки жидкого металла необходимо определять с учетом величины недолива расплава и конусности стенок сборного кристаллизатора слябовой МНЛЗ.

Используемые в уравнениях (5) и (6) размеры лунки жидкого металла в ее поперечном сечении в требуемый момент времени следует рассчитывать по формулам

$$a_i = A_i - 2\xi_i; \quad (7)$$

$$b_i = B_i - 2\xi_i, \quad (8)$$

где A_i , B_i – толщина и ширина отливаемого сляба в i -й момент времени с учетом термического конуса заготовки, м.

Толщина корочки затвердевшего металла в необходимый момент времени определяется из уравнения [12]

$$\xi_i = k_3 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{h_i}{w}}, \quad (9)$$

где k_3 – коэффициент затвердевания разливаемой стали, мм/мин^{0.5}; w – скорость вытягивания сляба из кристаллизатора, м/мин.

Величина коэффициента затвердевания стали зависит от химического состава и величины перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус.

С использованием уравнений (5) – (9) были рассчитаны значения распирающего давления жидкого металла при отливке сляба сечением 190×1200 мм со скоростью вытягивания 1,25 м/мин и заготовки 270×1200 мм со скоростью 0,9 м/мин из стали СтЗсп. Величина перегрева металла в промежуточном ковше над температурой ликвидус (1518 °С) была принята равной 20 °С. В слоях жидкого металла от зеркала в кристаллизаторе до выхода из него величина перегрева снижается линейно от принятой величины до нуля. В лунке жидкого металла с плотностью 7,2 т/м³ ниже кристаллизатора перегрев металла отсутствует. Коэффициент затвердевания металла (k_3 , мм/мин^{0.5}) зависит от величины перегрева металла ($\Delta t_{\text{пер}}$, °С) по следующей зависимости [13]:

$$k_3 = 25,45 - 0,0475 \Delta t_{\text{пер}}.$$

В расчетах использованы данные о настройке кристаллизатора и роликовых секций при отливке слябовых заготовок сечением 190×1200 мм и 270×1200 мм.

Результаты расчетов представлены на рис. 3. Анализ данного рисунка показывает, что в слябе сечением 190×1200 мм затвердевшая оболочка узкой грани уже на расстоянии 500 мм от зеркала металла в кристаллизаторе способна выдерживать внутреннее давление расплава, т. е. тогда, когда заготовка находится еще внутри кристаллизатора. Поэтому образования выпуклости узких граней отливаемой заготовки толщиной 190 мм не происходит. Совсем иная картина наблюдается при отливке сляба с размерами поперечного сечения 270×1200 мм. В этом случае затвердевшая оболочка узкой грани заготовки начинает выдерживать распирающее давление расплава на значительно большем удалении от зеркала металла – 1610 мм. С учетом того, что высота металла в кристаллизаторе составляет 800 мм (при величине недолива расплава, равной

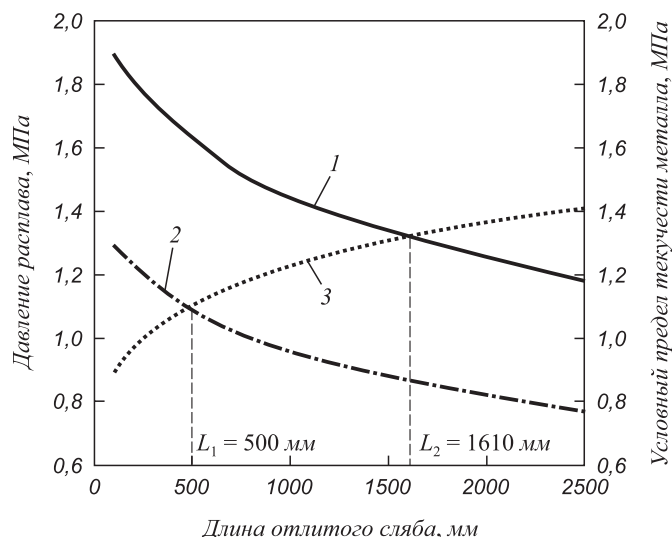


Рис. 3. Изменение прочности корочки и внутреннего давления расплава на корочку узкой грани по длине слэбов разного сечения из стали СтЗсп:

1 – давление расплава на корочку в слэбе сечением 270×1200 мм;
2 – давление расплава на корочку в слэбе сечением 190×1200 мм;
3 – условный предел текучести корочки из стали СтЗсп

Fig. 3. Changes in the strength of the crust and the internal pressure of the melt on the crust along the length of the narrow side of slabs with various cross sections of steel 3sp (Russian grade):

1 – pressure of the melt on the crust in the slab with cross-section of 270×1200 mm; 2 – pressure of the melt on the crust in the slab with cross-section of 190×1200 mm; 3 – yield strength of steel crust

100 мм, в кристаллизатор высотой 900 мм), длина поддерживающей системы узких граней заготовки должна быть равна 810 мм. Существующая на раме кристаллизатора система из четырех роликов обеспечивает поддержку каждой узкой грани отливаемого слэба на расстоянии 640 мм от низа кристаллизатора, однако этого явно недостаточно. Для эффективной поддержки узких граней на раму под кристаллизатором рекомендуется установить с каждой стороны по дополнительному ролику диаметром 130 мм.

Таким образом, в результате проведенных расчетов и экспериментальных исследований определена рациональная протяженность поддерживающей системы, расположенной на раме кристаллизатора, для предотвращения образования выпуклости узких граней слэбовой заготовки с размерами поперечного сечения 270×1200 мм в условиях ОАО «Уральская Сталь».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Изучение качества слэбовой заготовки, отлитой на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2013. № 1 (41). С. 27 – 30.
2. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Искажение профиля непрерывнолитого слэба в условиях ОАО «Уральская Сталь» // Металлургические процессы и оборудование. 2014. № 1(35). С. 13 – 18.
3. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Анализ влияния технологических параметров разлива стали на качество непрерывнолитого слэба и листового проката // Теория и технология металлургического производства. 2013. № 1(13). С. 21 – 23.
4. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Изучение влияния выпуклости узких граней непрерывнолитых слэбов на качество листового проката // Литейные процессы: Межрегион. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2013. Вып. 12. С. 129 – 134.
5. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н., Баранчиков К.В. Изучение искажения поперечного сечения непрерывнолитого слэба // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 1. С. 34 – 37.
6. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Методика определения рациональной длины поддерживающей системы узких граней непрерывнолитого слэба для предотвращения выпуклования // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2014. № 3(47). С. 32 – 36.
7. Буланов Л.В., Константинов Г.В. Расчет напряженного состояния роликов МНЛЗ при пластических деформациях // Динамика и прочность металлургических машин: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИМЕТМАШ, 1984. С. 38 – 46.
8. Писаренко Г.С., Яковлев А.П. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.
9. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Анализ условий получения узких граней слэбовой непрерывнолитой заготовки без дефекта «выпуклость» // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Материалы 71-й Межрегион. науч.-технич. конф. / под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: МГТУ, 2013. Т. 1. С. 158 – 161.
10. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Изучение механических свойств поверхностного слоя непрерывнолитой слэбовой заготовки // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 2. С. 38 – 41.
11. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1981. – 718 с.
12. Столяров А.М., Селиванов В.Н. Технологические расчеты по непрерывной разливке стали: Учеб. пособие. – Магнитогорск: МГТУ, 2011. – 67 с.
13. Мошкун В.В., Столяров А.М. Корректировка скорости вытягивания слэбов из трубной стали, отливаемых на МНЛЗ с мягким обжатием // Литейные процессы: Межрегион. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2012. Вып. 11. С. 146 – 151.

© 2015 г. Шевченко Е.А., Столяров А.М.,
Шаповалов А.Н., Баранчиков К.В.
Поступила 12 сентября 2014 г.

RATIONAL LENGTH OF SUPPORTED SYSTEM OF NARROW FACES OF CONCAST BILLET FOR PREVENTING ITS CONVEXITY

Shevchenko E.A.¹, Postgraduate of the Chair “Ferrous Metals” (nfmisis-nis@yandex.ru)

Stolyarov A.M.¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Ferrous Metals”

Shapovalov A.N.², Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of Chair “Metallurgical Technologies”

Baranchikov K.V.³, Head of Laboratory of Continuous Casting

¹ Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov (38, Lenina ave., Magnitogorsk, 455000, Russia)

² Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology "MISIS" (8, Frunze str., Novotroitsk, Orenburg Region, 426359, Russia)

³ JSC "Ural Steel" (1, Zavodskaya str., Novotroitsk, Orenburg Region, 462356, Russia)

Abstract. Urgent task for JSC "Ural Steel" is to determine the length of a rational supporting system on the frame of the mold to prevent the formation of bulges narrow edges of slabs with cross-sectional dimensions of 270×1200 mm. The technique is based on a comparison of the strength of the hardened crust narrow workpiece edge at different points in the length of the cast slab and the calculated value Expander pressure of liquid metal on the crust is used to solve this problem. Peel strength of the hardened slab in the possibility of plastic deformation of the shell may have yield strength of conventional cast steel. Experimental determination of the yield strength of cast steel grades 09G2S and 15HSND was conducted on high-temperature setting «Zwick / Roell Z1600H» in the temperature range 900–1400 °C. The value Expander pressure of liquid metal acting on the hardened crust slab was designed by the developed technique, which allows to take into account the specific conditions for the considered caster. Comparing the experimental and calculated values of the parameters established that the hardened crust of the narrow side of the slab thickness of 270 mm starts to withstand bursting pressure melt away from the metal mirror is equal to 1610 mm. With regard to the height of the metal mold (800 mm) length of the narrow sides of the support preform should be 810 mm. This can be possible if the number of support rollers with a diameter of 130 mm for each side of the workpiece is increased from four to five. The studies identified a rational extension of the supporting system located on the frame of the mold to prevent the formation of bulges narrow faces of slab blanks with cross-sectional dimensions of 270×1200 mm in terms of "Ural Steel".

Keywords: continuous cast slab, narrow face, bulge, support system, rational length.

REFERENCES

1. Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N. The study of the quality of slab blanks casted on curve type continuous caster with a curved vertical portion. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2013, no. 1 (41), pp. 27–30. (In Russ.).
2. Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N. Distortion of the profile of continuously cast slab at JSC "Ural Steel". *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie*, 2014, no. 1(35), pp. 13–18. (In Russ.).
3. Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N. Analysis of the influence of process parameters on the quality of the casting of continuously cast slabs and sheet. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*, 2013, no. 1(13), pp. 21–23. (In Russ.).
4. Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N. *Izuchenie vliyaniya vypuklosti uzkih granei nepreryvnoykh slyabov na kachestvo listovogo prokata* [The study of the effect of convexity narrow faces of continuously cast slabs on the quality of sheet metal]. In: *Liteinye protsessy: mezhregion. sb. nauch. tr.* [Casting processes: Collection of interregional articles] Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova, 2013. Issue 12, pp. 129–134. (In Russ.).
5. Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N., Baranchikov K.V. Study of distortion of cross-section continuously cast slabs. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*, 2014, no. 1, pp. 34–37. (In Russ.).
6. Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N. Rational method of determining the length of the supporting system of narrow faces of continuously cast slabs to prevent buckling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2014, no. 2 (47), pp. 31–35. (In Russ.).
7. Bulanov L.V., Konstantinov G.V. *Raschet napryazhennogo sostoyaniya rolikov MNLZ pri plasticheskikh deformatsiyakh* [Calculation of stress state of caster rollers with plastic deformation]. In: *Dinamika i prochnost' metallurgicheskikh mashin. Sb. nauchnykh trudov* [Dynamics and strength of metallurgical machines: Collection of scientific papers]. Moscow: VNIIMETMASH, 1984, pp. 38–46.
8. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook of strength of materials]. Kiev: Nauk. dumka, 1988. 736 p. (In Russ.).
9. Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N. *Analiz uslovii polucheniya uzkih granei slyabovoi nepreryvnoy zagotovki bez defekta "vypuklosti"* [Analysis of the conditions for obtaining narrow faces of continuous cast slab without "bulge" defect]. In: *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 71-i mezhregional'noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Actual problems of modern science, technology and education: Proceedings 71st interregional scientific and technical conference]. Kolokol'tsev V.M. ed. Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova, 2013. Vol. 1, pp. 158–161. (In Russ.).
10. Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Engineering: Network electronic scientific journal], 2013, no. 1, pp. 38–41. (In Russ.).
11. Bronshtein I. N., Semendyaev K. A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov* [Mathematics for engineers and students of universities: Handbook]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1981. 718 p. (In Russ.).
12. Stolyarov A.M., Selivanov V.N. *Tekhnologicheskie raschety po nepreryvnoi razlivke stali: Uchebnoe posobie* [Process calculations for continuous casting of steel: Textbook]. Magnitogorsk: GOU VPO «MGTU», 2011. 67p. (In Russ.).
13. Moshkunov V.V., Stolyarov A.M. *Korrektirovka skorosti vytyagivaniya slyabov iz trubnoi stali, otlivaemykh na MNLZ s myagkim obzhatiem* [Adjustment of the withdrawal speed of slabs of steel pipe, cast on casters with soft compression]. In: *Liteinye protsessy: Mezhregion. sb. nauch. tr.* [Casting process: Interregional collection of scientific works]. Magnitogorsk: MGTU, 2012. Issue 11, pp. 146–151. (In Russ.).

Received September 4, 2014