

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ КОМБИНИРОВАННЫМ ПРОЦЕССОМ МНЛЗ + ЭШП

Л. Б. Медовар¹, А. П. Стовпченко¹, А. В. Сибирь²,
Е. А. Волченков^{1,3}, Е. А. Педченко^{1,3}, А. А. Полишко¹, В. А. Лебедь^{1,3}

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Национальная металлургическая академия Украины.

49600, г. Днепр, просп. Гагарина, 4. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

³Инжиниринговая компания «Элмет-Ролл».

03150, г. Киев-150, А. я. 259. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

Проведено компьютерное моделирование комбинированного процесса непрерывной разливки с электрошлаковым обогревом рельсовой стали. Применена программа THERCAST®, позволяющая учесть особенности конструкции конкретной машины непрерывного литья. Расчетным путем установлены исходные параметры не только скорости разливки, но и вторичного охлаждения и их влияние на глубину жидкометаллической ванны непрерывнолитого слитка. Рассмотрены особенности совмещения на машине непрерывного литья заготовок отдельных рудьев с разной скоростью вытягивания слитка. Библиогр. 10, табл. 1, ил. 4.

Ключевые слова: непрерывная разливка; ЭШП; вторичное охлаждение; осевая неоднородность; гиперэвтектоидная рельсовая сталь

Хорошо известно, что непрерывная разливка позволила значительно повысить качество сталей различного химического состава, в т. ч. и высокоуглеродистых. Однако и сегодня широко проводятся изыскания, направленные на повышение качества металла, отливаемого непрерывным способом. В частности это касается качества сталей для железнодорожных рельсов. Железнодорожный транспорт активно развивается по всему миру, одновременно растут и требования к рельсам. Лучшие рельсы сегодня производят в Японии на Nippon Steel [1]. На территории Украины, несмотря на увеличение загрузки железнодорожных путей, все также продолжают использовать рельсы из стали М76, К76 с содержанием углерода до 0,8 %. В то же время в мире все шире применяются рельсы из гиперэвтектоидных сталей с содержанием углерода значительно превышающим 0,8 % [1] (таблица).

Отметим также, что и в новом стандарте РФ ГОСТ Р51685-2013 самые высокие требования по механическим свойствам термоупрочненных рельсовых сталей для скоростного движения уступают вышеприведенным гиперэвтектоидным сталям с содержанием углерода более 1 %.

Вполне очевидно, что в гиперэвтектоидных сталях ликвационные процессы проходят значительно интенсивнее в сравнении с традиционными марками рельсовых сталей, а следовательно, получение качественной непрерывнолитой заготовки из этих сталей требует не только особого внимания, но и особых технологических приемов. Предварительные результаты испытаний комбинированного способа не-

прерывной разливки МНЛЗ + ЭШП [2, 3] позволили предположить, что этот способ может быть успешно применен и для разливки гиперэвтектоидных рельсовых сталей. Предложенный способ, сочетающий непрерывную разливку и электрошлаковый процесс для нагрева разливаемого металла и поддержания благоприятного температурного режима в кристаллизаторе, позволяет расширить диапазон скоростей разливки металла и снизить осевую ликвацию в непрерывнолитой заготовке. Основан он на применении токоподводящего кристаллизатора в качестве кристаллизатора МНЛЗ. Отметим, что идея электрошлакового обогрева металла в кристаллизаторе МНЛЗ впервые была предложена Б. И. Медоваром и его соратниками еще на первом этапе развития непрерывной разливки и электрошлакового переплава. На рис. 1 представлена схема электрошлакового обогрева металла в кристаллизаторе МНЛЗ нерасходуемыми (графитовыми) электродами [4].

Идея базировалась на том, чтобы за счет дополнительного тепла электрошлакового процесса

Содержание углерода и механические свойства рельсовых сталей			
Рельсовая сталь	C, мас. %	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %
Стандартная М76, К76	0,71...0,82	≥ 900	≥ 4
Гиперэвтектоидная	$\geq 0,8$	≥ 1290	$\geq 14,1$
	$\geq 0,9$	1350...1420	13,2...13,6
	$\geq 1,0$	1440	$\geq 10,7$

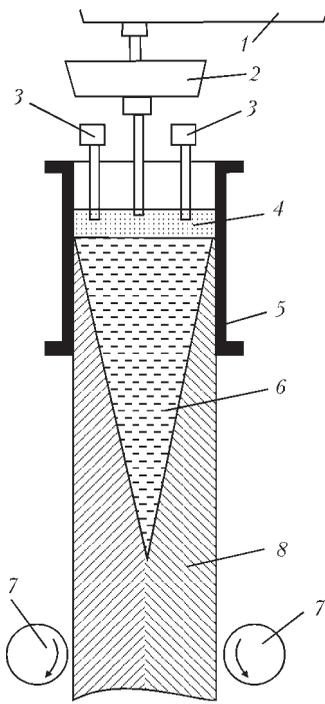


Рис. 1. Схема непрерывной разливки стали в сочетании с электрошлаковым обогревом мениска разливаемого металла в кристаллизаторе МНЛЗ: 1 — сталеразливочный ковш; 2 — промежуточный ковш; 3 — нерасходуемые электроды; 4 — шлаковая ванна; 5 — кристаллизатор; 6 — жидкий металл; 7 — тянущие валки; 8 — заготовка

добиться снижения осевой неоднородности непрерывнолитого слитка. Но в те годы, идея совмещения МНЛЗ и ЭШП не нашла применения. Тем не менее, даже при нынешнем развитии методов электромагнитного воздействия (перемешивания и торможения) на жидкометаллическую сердцевину непрерывно отливаемого слитка добиться подавления осевой ликвации удастся далеко не всегда, особенно при разливке сталей с протяженной двухфазной зоной. Поэтому при поиске методов подавления ликвации в гиперэвтектидных рельсовых сталях предположили, что снижение скорости разливки может помочь в этом. Однако хорошо известно и то, что снижение скорости непрерывной разливки невозможно ниже некоторого порога, определяемого в конечном итоге конструкцией данной машины непрерывной разливки и маркой разливаемой стали. При снижении скорости ниже этого условного порога отлить непрерывно слиток с хорошей поверхностью невозможно. Применение электрошлакового обогрева может снизить указанный порог минимальной скорости разливки, а значит и позволить уменьшить осевую неоднородность слитка.

Опыты по применению токоподводящего кристаллизатора для непрерывной и полунепрерывной разливки жидкого металла проводили в лабораторных условиях Института электросварки им. Е. О. Патона (ИЭС) с использованием кристаллизаторов с внутренним диаметром 110, 180, 215 и

350 мм, а 620 мм — в условиях «Опытного завода спецэлектрометаллургии ИЭС». Проводили их как с обычными углеродистыми сталями, так и с инструментальными типа Х12МФ и легированными типа Х18АГ18. Эти опыты подтвердили предположение о возможности снижения центральной неоднородности слитка за счет уменьшения скорости разливки. Математическое моделирование изменения глубины двухфазной зоны круглого непрерывнолитого слитка углеродистой стали провели используя традиционные подходы.

Дифференциальное уравнение теплопроводности для круглого непрерывно отливаемого слитка в цилиндрической системе координат имеет следующий вид:

$$C(T)\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T)r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где C, ρ, λ — теплоемкость, плотность и теплопроводность соответственно.

Граничные условия в каждой из различных областей теплопередачи между непрерывно отливаемым слитком и различными технологическими элементами и зонами всех частей машины непрерывного литья определяются следующими выражениями:

на поверхности шлаковой смеси в кристаллизаторе

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{\Omega_1} = q_{slag}; \quad (2)$$

на оси непрерывно отливаемого слитка

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\Omega_2} = 0; \quad (3)$$

в зоне плотного прилегания корочки слитка к стенке кристаллизатора

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\Omega_3} = \alpha_1 (T - T_m); \quad (4)$$

в зоне зазора между корочкой слитка и кристаллизатором

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\Omega_4} = \alpha_2 (T - T_m) + \sigma_0 \varepsilon_s (T^4 - T_m^4) \quad (5)$$

в зонах вторичного охлаждения водно-воздушной смесью

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\Omega_5} = \alpha_3 (T - T_w) + \sigma_0 \varepsilon_{Me} (T^4 - T_w^4); \quad (6)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\Omega_6} = \alpha_4 (T - T_w) + \sigma_0 \varepsilon_{Me} (T^4 - T_w^4); \quad (7)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{\Omega_7} = \alpha_5 (T - T_w) + \sigma_0 \varepsilon_{Me} (T^4 - T_w^4); \quad (8)$$

в конце вытягивания непрерывного слитка

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{\Omega_8} = \sigma_0 \varepsilon_{Me} (T^4 - T_0^4); \quad (9)$$

в зоне затравки

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{\Omega_9} = 0, \quad (10)$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана–Больцмана; $\epsilon_{Me}, \epsilon_s$ — степень черноты поверхности слитка и кристаллизатора соответственно; α — коэффициент теплоотдачи; q_{slag} — тепловой поток на поверхности нерасходуемого электрода (токоподводящего кристаллизатора); T_0 — температура окружающей среды; T_w — температура охлаждающей воды; T_m — температура поверхности кристаллизатора; Ω_{1-9} — соответствует положению поверхностей и/или осей теплопередачи от оси слитка до его поверхности в различных зонах по высоте кристаллизатора и условным четырем зонам вторичного охлаждения.

Теплоемкость слитка с учетом скрытой теплоты затвердевания определяли по следующей зависимости:

$$C = \begin{cases} C_L & T > T_L \\ fC_s + (1-f)C_L + \frac{L}{T_L - T_s} & T_s \leq T \leq T_L \\ C_s & T < T_s \end{cases}, \quad (11)$$

где C_s, C_L — теплоемкость металла в твердом и жидком состоянии; L — теплота фазового перехода; $f = (T - T_s)/(T_s - T_L)$ — доля твердой фазы в двухфазной зоне.

Теплопроводность слитка определяли в соответствии с работой [5]:

$$\lambda = \begin{cases} K\lambda_L & T > T_L \\ \lambda_L [1 + (\lambda_c - 1)f^2] & T_s \leq T \leq T_L \\ \lambda_s & T < T_s \end{cases}, \quad (12)$$

где K — экспериментальный коэффициент.

Результаты расчетов для слитка диаметром 500 мм и различных скоростей разливки приведены на рис. 2. Они показали, что несмотря на то, что при расчетах были учтены эффекты влияния четырех зон вторичного охлаждения, отличающихся эффективностью теплоотвода, сохраняется практически прямолинейная зависимость уменьшения глубины жидкометаллической и двухфазной зон от уменьшения скорости разливки. Расчетное уменьшение глубины двухфазной зоны с 29 до 11 м позволяет предположить, что предлагаемый комбинированный способ непрерывной или полунепрерывной разливки в сочетании с ЭШО может быть перспективным при полунепрерывной отливке кузнечных слитков большого сечения на вертикальных машинах [6]. Отметим также, что отчетливо проявился новый виток интереса к полунепрерывной разливке, демонстрируемый в последние годы в Австрии, Германии, Китае и некоторых других странах [7]. В сочетании с фактом

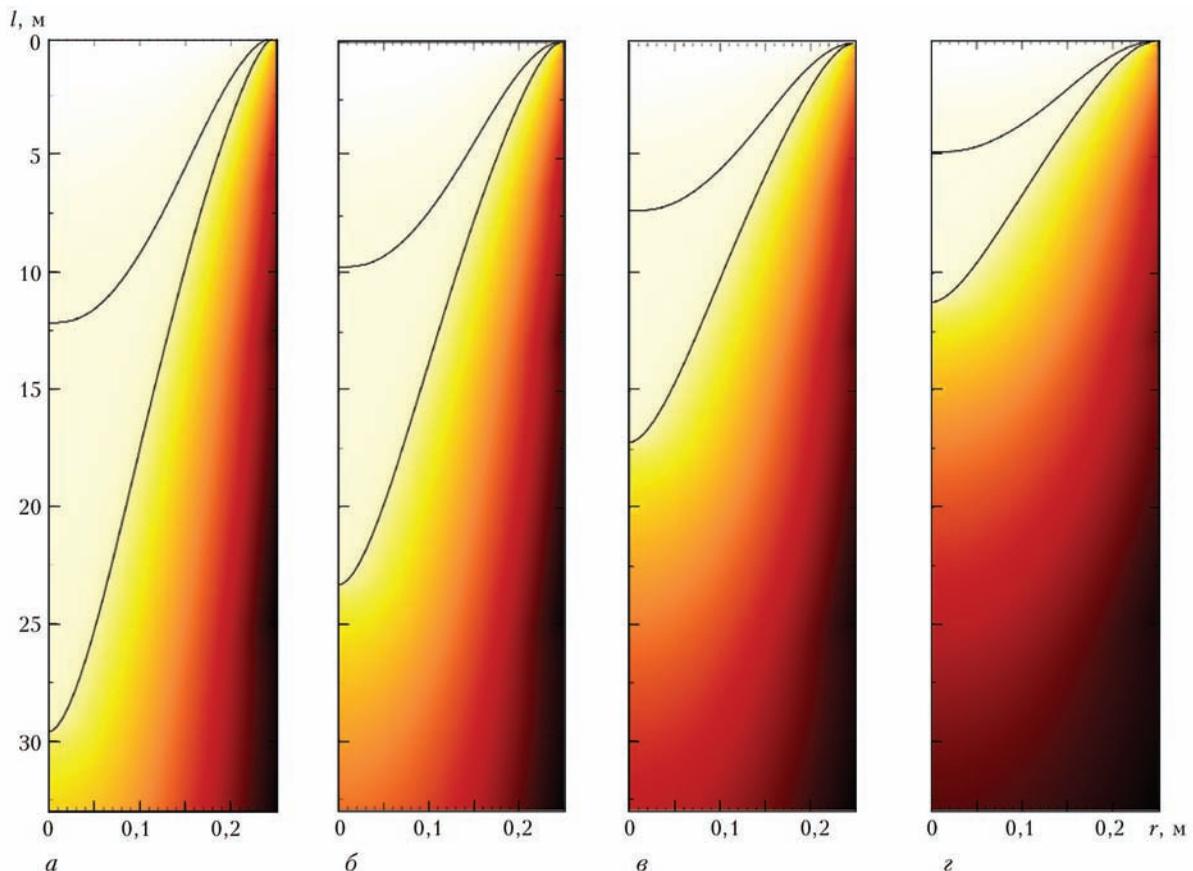


Рис. 2. Температурное поле непрерывнолитых слитков диаметром 500 мм в зависимости от скорости разливки, м/мин: а — 0,5; б — 0,4; в — 0,3; з — 0,2

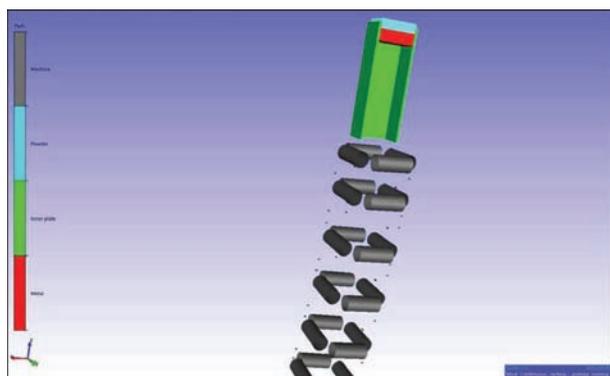


Рис. 3. Общий вид окна программы THERCAST® модели непрерывной разливки рельсовой стали

ввода в эксплуатацию в США, Ю. Корею и Китай ряда вертикальных машин непрерывного литья слитков диаметром до 1000 мм [8–10] исследования в данном направлении необходимо расширить с целью получения не только качественной заготовки для прокатки рельсов высокого качества, а и кузнечного слитка.

Полученные расчетные данные, а также проведенные в промышленных условиях испытания шлака ЭШП вместо разливочной смеси при непрерывном литье дали положительный результат [3]. Это позволило вернуться к дальнейшему поиску путей повышения качества именно рельсовой стали.

Следующим шагом к реализации способа МНЛЗ + ЭШП было создание математической модели конкретной машины непрерывного литья криволинейного типа для расчетов влияния изменения скорости разливки на затвердевание заготовки рельсовой стали. В данном случае решение обычной задачи затвердевания непрерывно-литого слитка с фиксированной системой вторичного охлаждения недостаточно. Дело в том, что при значительном уменьшении скорости разливки необходимо адекватно изменять режим вторичного охлаждения по зонам, чтобы не столкнуться с перегрузкой отдельных элементов вытягивания слитка. Для создания математической модели реальной МНЛЗ был применен программный продукт THERCAST® французской компании Transvalor [10], широко применяемый сегодня для численных исследований непрерывной разливки. Особенности этой программы позволяют учесть условия разливки на конкретной

МНЛЗ. Модель создана для МНЛЗ Днепропетровского меткомбината с учетом реального размера кристаллизатора, поперечное сечение которого 335×400 мм и схемы расположения направляющих и тянущих роликов. Учитывали также конфигурацию и расположение системы вторичного охлаждения. Моделирование разлива проводили от погружного стакана до окончания лунки жидкого металла, т.е. полной металлургической длины МНЛЗ. Скорость разлива: 200, 300, 500 и 600 мм/мин. Рабочая часть кристаллизатора 850 мм. Модельным материалом выбрали эвтектоидную рельсовую сталь R350TH (0,72...0,80 % C; 0,15...0,58 % Si; 0,70...1,20 % Mn; P, S ≤ 0,0204 %; Al ≤ 0,004 %; Cr ≤ 0,15 %) с $T_L = 1467$ и $T_S = 1174$ °C. По результатам компьютерного моделирования установлено, что с уменьшением скорости от стандартной 600 до желаемой 200 мм/мин наблюдается существенное уменьшение доли жидкого металла, находящегося в двухфазной зоне. На расстоянии 1000 мм от нижней части кристаллизатора она уменьшается с 55 до 20 %, что позволяет прогнозировать уменьшение осевой неоднородности.

На рис. 3 и 4 показаны этапы численных экспериментов по оценке изменения глубины жидкометаллической лунки при неизменных параметрах вторичного охлаждения.

Эти расчетные данные свидетельствуют о перспективности предложенного метода снижения осевой неоднородности, но они требуют предварительной оценки возможностей реального промышленного производства. Речь идет о том, что в промышленных условиях рельсовую сталь обычно разливают на 5-6-ручьевых машинах с общим промежуточным ковшем для всех ручьев. Возможные проблемы при разливке серии из нескольких плавов при существенном (в несколько раз) снижении скорости вытяжки на одном или нескольких ручьях могут возникнуть при реализации коротких серий разливок методом «плавка–наплавку». Иными словами, при переходе от разливки рельсовой стали к разливке другой марки, не требующей снижения скорости разливки, возможны ситуации, когда необходимо прерывать разливку на ручье, реализующем процесс МНЛЗ + ЭШП.

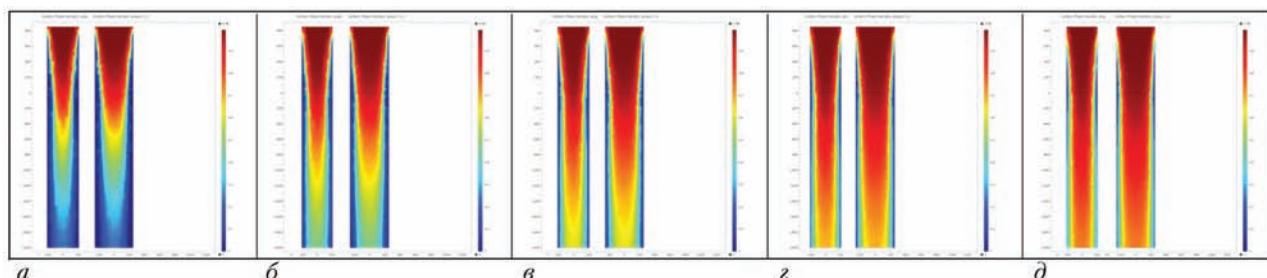


Рис. 4. Изменение глубины жидкометаллической ванны (лунки) при разливке МНЛЗ + ЭШП заготовки рельсовой стали с изменением скорости, мм/мин: 200 (а), 300 (б), 400 (в), 500 (г), 600 (д)

Список литературы

1. Nippon Steel and Sumitomo Metal (2015) *Rails*. http://www.nssmc.com/product/catalog_download/pdf/K003en.pdf
2. Медовар Л. Б., Стовпченко А. П., Кайда П. Н. и др. (2016) Новый подход к улучшению качества заготовки для производства высокопрочных рельсов. *Современная электрометаллургия*, **1**, 7–15.
3. Kayda P., Medovar L., Polishko G., Stovpchenko G. (2015) ESR Possibilities to improve railroad rail steel performance. *Procesing of 9th Intern. Conf. on Clean Steel*, Budapest, Hungary, September 8–10, 2015.
4. Медовар Б. И., Латаш Ю. В., Максимович Б. И., Ступак Л. М. (1963) *Электрошлаковый переплав*. Москва, ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии.
5. Lally B., Biegler L., Henein H. (1990) Finite difference heat-transfer modeling for continuous casting. *Metallurgical transactions B*, **21B**, 761–770.
6. Марченко И. К. (1986) *Полунепрерывное литье стали*. Москва, Металлургия.
7. (2015) <http://www.inteco.at/en/products>
8. Jumbo Bloom Vertical Caster (2017) <http://www.timkensteel.com>
9. Oversized blooms experience and market potential in Asia (2017) <http://seaisi.org/seaisi2017/file/file/presentation-file/10A-4.pdf>
10. <http://www.transvalor.com>

References

1. Nippon Steel and Sumitomo Metal (2015) *Rails*. http://www.nssmc.com/product/catalog_download/pdf/K003en.pdf
2. Medovar, L.B., Stovpchenko, A.P., Kaida, P.N. et al. (2016) New approach to the improvement of quality of billets for manufacture of high-strength rails. *Sovrem. Electrometall.*, **1**, 7–15 [in Russian].
3. Kayda, P., Medovar, L., Polishko, G., Stovpchenko, G. (2015) ESR possibilities to improve railroad rail steel performance. In: *Proc. of 9th Intern. Conf. on Clean Steel* (2015, September 8–10, Budapest, Hungary).
4. Medovar, B.I., Latash, Yu.V., Maksimovich, B.I., Stupak, L.M. (1963) *Electroslag remelting*. Moscow, GNTI [in Russian].
5. Lally, B., Biegler, L., Henein, H. (1990) Finite difference heat-transfer modeling for continuous casting. *Metallurgical Transact. B*, **21B**, 761–770.
6. Marchenko, I.K. (1986) *Semicontinuous casting of steel*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
7. (2015) <http://www.inteco.at/en/products>
8. Jumbo Bloom Vertical Caster (2017) <http://www.timkensteel.com>
9. Oversized blooms experience and market potential in Asia (2017) <http://seaisi.org/seaisi2017/file/file/presentation-file/10A-4.pdf>
10. <http://www.transvalor.com>

МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ КОМБІНОВАНИМ ПРОЦЕСОМ МБЛЗ + ЕШП

Л. Б. Медовар¹, Г. П. Стовпченко¹, А. В. Сибір², Є. О. Волченков^{1,3}, Є. О. Педченко^{1,3}, Г. О. Полішко¹, В. А. Лебідь^{1,3}

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Національна металургійна академія України.

49600, м. Дніпро, просп. Гагаріна, 4. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

³Інжинирінгова компанія «Елмет-Рол».

03150, м. Київ-150, А. с. 259. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

Виконано комп'ютерне моделювання комбінованого процесу безперервного розливання з електрошлаковим обігрівом рейкової сталі. Використано програму THERCAST[®], що дозволяє врахувати особливості конструкції конкретної машини безперервного лиття. Розрахунковим шляхом встановлено початкові параметри не тільки швидкості розливання, але і вторинного охолодження та їх вплив на глибину рідкометалевої ванни безперервнолитого злитка. Розглянуто особливості поєднання на одній машині безперервного лиття заготовок струмків з різною швидкістю витягування злитків. Бібліогр. 10, табл. 1, іл. 4.

Ключові слова: безперервна розливка; ЕШП; вторинне охолодження; осьова неоднорідність; гіперевтектоїдна рейкова сталь

MODELING OF CONTINUOUS CASTING BY COMBINED PROCESS OF MCCB + ESR

L.B. Medovar¹, A.P. Stovpchenko¹, A.V. Sibir², Ye.A. Volchenkov^{1,3}, E.A. Pedchenko^{1,3}, A.A. Polishko¹, V.A. Lebed^{1,3}

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kiev, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²The National Metallurgical Academy of Ukraine.

4 Gagarin Ave., 49600, Dnepr, Ukraine. E-mail: nmetau@nmetau.edu.ua

³Engineering company «Elmet-Roll».

03150, Kiev-150, P.B. 259. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

Computer modeling of a combined process of continuous casting with electroslag heating of a rail steel was carried out. The program THERCAST[®] was applied, which allows accounting for the peculiarities of design of a definite continuous casting machine. Using calculations, the initial parameters of not only of casting speed, but also of secondary cooling and their effect on depth of molten pool of a continuously-cast ingot were established. The peculiarities of matching the billets of separate passes at different speed of the ingot withdrawal were also studied. 10 Ref., 1 Table, 4 Fig.

Key words: continuous casting; ESR; secondary cooling; centerline segregation; hypereutectoid railroad steel

Поступила 02.10.2017