

показателей пластичности и вязкости литого металла. Поэтому чем выше концентрация серы в металле, тем в большей степени он загрязнен неметаллическими включениями и тем ниже будут показатели ударной вязкости.

Заключение

Проведенный анализ указывает на необходимость и целесообразность разработки технологий модифицирования и рафинирования расплавов стали с целью получения стабильно низких концентраций серы для обеспечения высоких свойств отливок. Также необходимо внести изменения в стандарты на изготовление стальных отливок по

содержанию серы в сталях. Существующие стандарты допускают содержание серы до 0,05% при основном процессе плавки и до 0,06% – при кислом [2]. В то же время зарубежные стандарты, например ASTM, DIN и др., предусматривают содержание серы не более 0,03%.

Список литературы

1. Лунёв В.В., Аверин В.В. Сера и фосфор в стали. М.: Metallurgy, 1988. 256 с.
2. Шульте Ю.А. Электрометаллургия стального литья. М.: Metallurgy, 1970. 328 с.
3. ГОСТ 977-88. Отливки стальные. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1989. 56 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PROBLEM WITH SULFUR IN CAST STEEL

Kolokoltsev Valery Mikhailovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Rector of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Tel.: +7 (3519) 29 84 02. E-mail: kwm@magtu.ru.

Kotok Alexey Petrovich – Ph.D. (Eng.), Chief Engineer of CJSC Mechanical repair complex, OJSC MMK, Russia.

Dolbilov Kirill Alexandrovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia.

Abstract. This article studies the effect of sulfur on the mechanical properties of cast steels used for shaped castings. It is shown that the sulfur content in steels above 0.023% leads to a sharp decrease in their strength, toughness, ductility, which significantly reduces the operational stability of castings. We made a conclusion about the need to introduce new steel desulfurization technologies in the steel foundry.

Keywords: cast steel, electric arc furnace, sulfur, nonmetallic inclusions, mechanical properties.

References

1. Lunev V.V., Averin V.V. *Sera i fosfor v stali* [Sulfur and phosphorus in steel]. Moscow: Metallurgy, 1988, 256 p.
2. Shulte Yu.A. *Ehlektrometallurgiya stal'nogo lit'ya* [Electrometallurgy of steel casting]. Moscow: Metallurgy, 1970, 328 p.
3. GOST 977-88. Steel castings. General specifications. Moscow: 1989, 56 p.

УДК 621.74.047

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УЗКИХ ГРАНЕЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛЯБА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЫПУЧИВАНИЯ

Шевченко Е.А.¹, Столяров А.М.¹, Шаповалов А.Н.²

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

² Новотроицкого филиала НИТУ «МИСиС», Россия

Аннотация. Разработана методика определения рациональной длины поддерживающей системы из роликов, расположенной на раме кристаллизатора, узких граней непрерывнолитого сляба. В ней предлагается производить проверку соотношения между внутренним распирающим давлением жидкого металла и условным пределом текучести затвердевшего металла корочки заготовки.

Ключевые слова: непрерывнолитой сляб, узкие грани, выпучивание, методика, кристаллизатор, роликовая система, рациональная длина.

Введение

Известно [1–6], что искажение поперечного сечения слябовой непрерывнолитой заготовки, как правило, происходит вследствие образования выпуклости широких граней заготовки. Однако специалисты ОАО «Уральская Сталь» столкнулись с проблемой регулярного возникновения выпуклости узких граней слябов сечением 270×1200 мм, в то время как на заготовках с размерами поперечного сечения 190×1200 мм данный дефект отсутствовал.

Разливка стали производилась на одноручевой МНЛЗ фирмы «SMS Demag» криволинейного типа с вертикальным участком, имеющей базовый радиус 10,5 м и металлургическую длину 30,3 м. В начальный период эксплуатации сталь разливалась в кристаллизатор высотой 900 мм с поддерживающей системой на раме кристаллизатора из одного ряда роликов. При этом слябы толщиной 270 мм, вытягиваемые со скоростью 0,9 м/мин, имели выпуклость узких граней до 12 мм. Затем поддерживающая система узких граней сляба была увеличена до четырех роликов. Это позволило при той же скорости вытягивания слябов снизить выпуклость их узких граней примерно вдвое, но не устранило этот дефект профиля заготовки полностью. В ранее проведенных исследованиях [7–9] была установлена тесная взаимосвязь между выпуклостью узких граней слябов толщиной 270 мм и степенью развития как внутренних, так и поверхностных дефектов отлитой заготовки и произведенного из него толстого горячекатаного листа. Выпуклость узкой грани непрерывнолитого сляба образуется из-за недостаточной толщины корочки затвердевшего металла на выходе из поддерживающей системы кристаллизатора. Наиболее эффективным способом увеличения толщины корочки является снижение скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора. Однако применение такого способа на одноручевой МНЛЗ неизбежно ведет к снижению производительности как машины, так и всего цеха в целом и является неприемлемым решением проблемы. При условии сохранения существующей скорости вытягивания сляба из кристаллизатора для предотвращения образования выпуклости узких граней отливаемого сляба необходимо увеличить длину поддерживающей системы, расположенной на раме кристаллизатора [10–12]. С целью определения рациональной длины системы, поддерживающей узкие грани сляба, предложена следующая методика.

Материалы и методы исследования

Для предотвращения выпучивания затвердевшей корочки узкой грани непрерывнолитого сляба

под воздействием распирающего давления жидкого металла необходимо выполнение неравенства

$$P_{расн_i} < \sigma_{T_i}, \quad (1)$$

где $P_{расн_i}$ – распирающее давление жидкого металла на затвердевшую корочку в центре узкой грани сляба в i -й момент времени, МПа; σ_{T_i} – условный предел текучести металла затвердевшей корочки в i -й момент времени, МПа.

В зоне вторичного охлаждения под кристаллизатором затвердевшую корочку узкой грани сляба условно можно рассматривать как балку с жестко закрепленными концами, находящуюся под равномерно распределенной нагрузкой со стороны жидкого металла [6, 13]. В результате действия этой нагрузки в затвердевшей корочке возникают изгибающие моменты, которые стремятся участки корочки в середине узкой грани деформировать наружу, а угловые участки – внутрь, то есть привести к искажению профиля отливаемой заготовки. Тогда величину распирающего давления жидкого металла на затвердевшую корочку в центре узкой грани сляба можно определить из уравнения [14]

$$P_{расн_i} = \frac{6 M_{a_i}}{\xi_i^2 \cdot h_i}, \quad (2)$$

где M_{a_i} – изгибающий момент в центре узкой грани сляба в i -й момент времени, Н·м; ξ_i – толщина затвердевшей корочки сляба в i -й момент времени, м; h_i – высота столба жидкого металла в i -й момент времени, м.

Известно [14], что величина изгибающего момента для середины нагруженной балки рассчитывается по формуле

$$M_{a_i} = \frac{q_i \cdot a_i^2}{24}, \quad (3)$$

где q_i – удельная сила воздействия жидкого металла на корочку в i -й момент времени, Н/м; a_i – протяженность фронта кристаллизации в поперечном сечении по узкой грани сляба в i -й момент времени, м.

Величина удельной силы воздействия жидкого металла на затвердевшую корочку заготовки прямо пропорциональна ферростатическому давлению расплава согласно выражению

$$q_i = P_{\phi_i} \cdot h_i, \quad (4)$$

где P_{ϕ_i} – ферростатическое давление жидкого металла в i -й момент времени, H/M^2 .

Ферростатическое давление столба жидкого металла определяется по формуле

$$P_{\phi_i} = \frac{\rho_{жс} \cdot V_{жс_i} \cdot g}{S_i}, \quad (5)$$

где $\rho_{жс}$ – плотность жидкого металла, m/m^3 ; $V_{жс_i}$ – объем лунки жидкого металла в i -й момент времени, m^3 ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; S_i – площадь поперечного сечения лунки жидкого металла в i -й момент времени, m^2 .

Схема воздействия распирающего давления жидкого металла на затвердевшую корочку узкой грани сляба под кристаллизатором показана на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что площадь поперечного сечения лунки жидкого металла в i -й момент времени может быть найдена из выражения

$$S_i = a_i \cdot b_i. \quad (6)$$

После подстановки формул (3)–(6) в уравнение (2) получается следующая зависимость:

$$P_{расп_i} = \frac{\rho_{жс} \cdot V_{жс_i} \cdot g \cdot a_i}{4b_i \cdot \xi_i^2}. \quad (7)$$

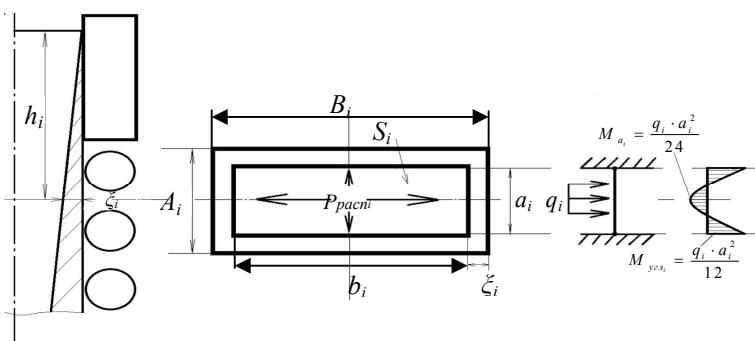


Рис. 1. Схема воздействия жидкого металла на затвердевшую корочку сляба

Верхняя часть лунки жидкого металла в слябе, отливаемом на МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком, может быть упрощенно представлена в виде перевернутой усеченной четырехгранной пирамиды (рис. 2).

Объем этой геометрической фигуры находится из уравнения [15]

$$V_{жс_i} = \frac{h_i}{6} [a_o \cdot b_o + (a_o + a_i) \times (b_o + b_i) + a_i \cdot b_i], \quad (8)$$

где a_o, b_o – размеры зеркала металла по узкой и широкой граням кристаллизатора соответственно, m ; a_i, b_i – размеры лунки жидкого металла в поперечном сечении в i -й момент времени, m .

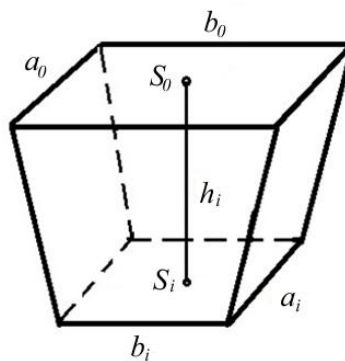


Рис. 2. Упрощенный вариант схемы верхней части лунки жидкого металла в слябе

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

Размеры лунки жидкого металла в ее поперечном сечении в требуемый момент времени следует рассчитывать по формулам:

$$a_i = A_i - 2\xi_i; \quad (9)$$

$$b_i = B_i - 2\xi_i, \quad (10)$$

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

Толщина корочки затвердевшего металла в необходимый момент времени определяется из уравнения [16]

$$\xi_i = k_3 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{h_i}{w}}, \quad (11)$$

где k_3 – коэффициент затвердевания стали, $mm/мин^{0.5}$; w – скорость вытягивания сляба из кристаллизатора, $m/мин$.

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

По высоте лунки жидкого металла в слябовой заготовке величина перегрева различная. Можно

принять, что в слоях жидкого металла от зеркала в кристаллизаторе до выхода из него величина перегрева снижается линейно от максимальной величины, до нуля. В лунке жидкого металла ниже кристаллизатора перегрев металла отсутствует.

Для предотвращения выпучивания затвердевшей корочки узкой грани сляба согласно выражению (1) необходимо, чтобы величина распирающего давления жидкого металла не превышала прочности корочки. При учете возможности пластической деформации затвердевшей корочки (без образования трещин) в качестве критерия прочности следует использовать условный предел текучести разлитой 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 из литературных источников. Однако эти данные редки и не всегда достоверны из-за трудностей с определением механических свойств металла в высокотемпературной области.

Результаты исследования и их обсуждение

Проверка условия выполнения неравенства (1), организованная в виде циклических вычислений через принятые равные промежутки времени с привязкой к длине отливаемого сляба, позволит определить расчетную точку на технологическом канале МНЛЗ, в которой прочность затвердевшей корочки узкой грани сляба начнет превышать распирающее давление жидкого металла. Это даст возможность найти протяженность участка от выхода из кристаллизатора до расчетной точки, на котором целесообразно осуществлять роликую поддержку узких граней заготовки для предотвращения их выпучивания.

Заключение

В работе предложена методика определения рациональной длины поддерживающей системы из роликов, расположенной на раме кристаллизатора, для предотвращения выпучивания узких граней непрерывнолитого сляба. Расчеты, проведенные по этой методике и выполненные в циклическом режиме через равные промежутки времени, позволят найти расстояние от выхода из кристаллизатора до той точки на технологическом канале МНЛЗ, в которой внутреннее распирающее давле-

ние жидкого металла окажется меньше прочности затвердевшей корочки, характеризуемой условным пределом текучести металла при высоких температурах. Ниже этой точки необходимость в поддержании узких граней сляба отсутствует.

Список литературы

1. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали. Донецк: ДонНТУ, 2011. 482 с.
2. Паршин В.М., Буланов Л.В. Непрерывная разливка стали. Липецк: ОАО «НЛМК», 2011. 221 с.
3. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Парфенов Е.П., Юровский Н.А., Авдонин В.Ю. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004. 320 с.
4. Столяров А.М., Селиванов В.Н. Непрерывная разливка стали. Ч. I. Конструкция и оборудование МНЛЗ: учеб. пособие. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. 154 с.
5. Столяров А.М., Селиванов В.Н. Технология непрерывной разливки стали: учеб. пособие. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 78 с.
6. Столяров А.М., Юречко Д.В., Селиванов В.Н. Формирование переходного участка непрерывнолитого сляба из стали разных марок. Магнитогорск: МГТУ, 2006. 94 с.
7. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Изучение качества слябовой заготовки, отлитой на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №1 (41). С. 27–30.
8. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Изучение влияния выпуклости узких граней непрерывнолитых слябов на качество листового проката // Литейные процессы: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. Вып. 12. С. 129–134.
9. Шевченко Е.А., Шаповалов А.Н. Проблемы получения качественной слябовой заготовки на МНЛЗ №2 ОАО «Уральская Сталь» // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2013. №1. С. 68–73
10. Шаповалов А.Н., Шевченко Е.А., Столяров А.М. Рациональная длина поддерживающей системы узких граней непрерывнолитого сляба для условий ОАО «Уральская Сталь» // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №1. С. 38–42.
11. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Искажение профиля непрерывнолитого сляба в условиях ОАО «Уральская Сталь» // Metallургические процессы и оборудование. 2014. №1(35). С. 13–18.
12. Изучение искажения поперечного сечения непрерывнолитого сляба / Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н., Баранчиков К.В. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2014. №1. С. 34–37.
13. Буланов Л.В., Константинов Г.В. Расчет напряженного состояния роликов МНЛЗ при пластических деформациях // Динамика и прочность металлургических машин: сб. науч. трудов. М.: ВНИИМЕТМАШ, 1984. С. 38–46.
14. Писаренко Г.С., Яковлев А.П. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наук. думка, 1988. 736 с.
15. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1981. 718 с.
16. Столяров А.М., Селиванов В.Н. Технологические расчеты по непрерывной разливке стали: учеб. пособие. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. 67 с.

METHOD OF DETERMINING THE RATIONAL LENGTH OF SUPPORTING SYSTEMS FOR NARROW FACES OF CONTINUOUSLY CAST SLABS TO PREVENT BULGING

Shevchenko Evgeny Alexandrovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: nfmisis-nis@yandex.ru.

Stolyarov Alexander Mikhailovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: sam52.52@mail.ru.

Shapovalov Aleksei Nikolaevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology MISiS, Russia. E-mail: alshapo@yandex.ru.

Abstract. We developed the technique for determining the rational length of the supporting system of rollers located on the frame of the mold for narrow faces of continuously cast slabs. It is proposed to inspect the relation between the internal bursting pressure of the molten metal and the proof stress of a solidified workpiece shell.

Keywords: continuously cast slab, narrow face, bulging, technique, mold, roller system, rational length.

References

- Smirnov A.N., Kubersky S.V., Shtepan E.V. *Nepreryvnaya razlivka stali* [Continuous casting of steel]. Donetsk: Donetsk National Technical University, 2011, 482 p.
- Parshin V.M., Bulanov L.V. *Nepreryvnaya razlivka stali* [Continuous casting of steel]. Lipetsk: OJSC NLMK, 2011, 221 p.
- Bulanov L.V., Korzunin L.G., Parfenov E.P., Yurovsky N.A., Avdonin V.Yu. *Mashiny nepreryvnogo litiya zagotovok. Teoriya i raschet* [Continuous casting machine. Theory and calculation]. Ekaterinburg: Urals Center for PR and Advertising Marat, 2004, 320 p.
- Stolyarov A.M., Selivanov V.N. *Stolyarov A.M., Selivanov V.N. Nepreryvnaya razlivka stali. Chast 1. Konstruktsiy i raschet MNLZ* [Continuous casting of steel. Part One. Construction and equipment of CCM, Textbook]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2007, 154 p.
- Stolyarov A.M., Selivanov V.N. *Tehnologiya nepreryvnoy razlivki* [Steel continuous casting process, Textbook]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2009, 78 p.
- Stolyarov A.M., Yurechko D.V., Selivanov V.N. *Formirovanie perekhodnogo uchastka nepreryvnolitogo slyaba iz stali raznykh marok* [Formation of the transition region of continuously cast slabs of steel of different grades]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2006, 94 p.
- Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N. The study of the quality of the slab cast on the vertical curved caster. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, vol. 1(41), pp. 27-30.
- Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N. Study of the influence of crown narrow faces of continuously cast slabs on the quality of sheet metal. *Liteynyye protsessy: Mezhtregion. sb. nauch. tr.* [Casting processes: interregional collected research papers]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, no. 12, pp. 129-134.
- Shevchenko E.A., Shapovalov A.N. The problems of obtaining high-quality slabs on caster #2 of JSC Ural Steel. *Vestnik YuUrGU, Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of the South Ural State University, Series: Metallurgy], 2013, no. 1, pp. 68-73.
- Shapovalov A.N., Shevchenko E.A., Stolyarov A.M. Rational length of the supporting system for narrow faces of continuously cast slabs for conditions of JSC Ural Steel. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy zhurnal* [Mechanical Engineering: Network electronic scientific journal]. 2013, no. 1, pp. 38-42.
- Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N. Distortion of the profile of continuously cast slabs at JSC Ural Steel. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie* [Metallurgical processes and equipment]. 2014, no. 1 (35), pp. 13-18.
- Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.N., Baranchikov K.V. Study of the cross-sectional distortion of continuously cast slabs. *Izvestiya vuzov. Chemaya metallurgiya* [Proceedings of the higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2014, no. 1, pp. 34-37.
- Bulanov L.V., Konstantinov G.V. Raschet napryazhennogo sostoyaniya rolikov MNLZ pri plasticheskikh deformatsiyakh [Calculation of the stress state of caster rollers with plastic deformation]. *Dinamika i prochnost metallurgicheskikh mashin: sb. nauchnykh trudov* [Dynamics and strength of metallurgical machines: Collected scientific papers]. Moscow: VNIIMETMASH, 1984, pp. 38-46.
- Pisarenko G.S., Yakovlev A.P. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Reference book on structural resistance]. Kiev: Naukova dumka, 1988, 736 p.
- Bronshtein I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov* [Handbook of mathematics for engineers and university students]. Moscow: Nauka, 1981, 718 p.
- Stolyarov A.M., Selivanov V.N. *Tekhnologicheskie raschety po nepreryvnoy razlivke stali* [Concasting process calculations: Textbook]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 67 p.