ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА РАЗЛИВКИ СТАЛИ НА КАЧЕСТВО СОРТОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

*А. М. СТОЛЯРОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры металлургии и химических технологий, sam52.52@mail.ru; А. М. РЕТУНСКАЯ, магистрант кафедры литейных процессов и материаловедения;
М. Г. ПОТАПОВ, канд. техн. наук, доцент кафедры литейных процессов и материаловедения;
М. В. ПОТАПОВА, канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии и химических технологий
(Институт металлургии, машиностроения и материалов обработки Магнитогорского государственного
технического университета им. Г.И. Носова, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск)*

Аннотация. Скорость вытягивания заготовок из кристаллизатора МНЛЗ оказывает решающее влияние на их производительность. Однако увеличение скорости приводит к повышению загрязненности литого металла неметаллическими включениями и росту количества поверхностных дефектов непрерывнолитой заготовки. Дана оценка влияния скоростного режима разлива стали на степень развития различных дефектов сортовой непрерывнолитой заготовки, отлитой на пятиручье МНЛЗ радиального типа. С целью установления степени влияния скорости вытягивания заготовки, химического состава металла и размеров поперечного сечения заготовки на их качество исследованы дефекты непрерывнолитой заготовки из стали СтЗсп сечением 150×150 мм. Изучен массив производственных данных качества более 550 заготовок, 80,4 % которых отлиты открытой струей, а остальная часть — закрытой. В результате исследования качества сортовых непрерывнолитых заготовок подтверждено, что при разливе металла открытой струей степень развития дефекта формы в виде ромбичности, внутренних и поверхностных дефектов выше, чем при разливе закрытой струей. Установлена общая тенденция роста загрязненности литого металла неметаллическими включениями с возрастанием скорости вытягивания заготовки при разливе стали как открытой, так и закрытой струей. Однако при разливе стали открытой струей этот рост происходит довольно равномерно, а при разливе закрытой струей наблюдается резкое увеличение числа отливок с дефектами при превышении скорости вытягивания заготовок более 2,4 м/мин. Выявлены линейные зависимости степени развития ликвационных трещин и полосок общих, краевых точечных загрязнений и толщины периферийной зоны металла с мелкокристаллической структурой от скорости вытягивания заготовки при разливе стали закрытой струей. Для улучшения качества поверхности сортовых заготовок, отлитых закрытой струей, рекомендуется ограничить скорость вытягивания заготовок из углеродистой стали обыкновенного качества величиной 2,4 м/мин.

Ключевые слова: непрерывная разливка стали, сортовая МНЛЗ, разливка металла открытой и закрытой струей, скорость непрерывной разливки стали, загрязненность непрерывнолитого металла неметаллическими включениями.

Ссылка для цитирования. Столяров А.М., Ретунская А.М., Потапов М.Г., Потапова М.В. Влияние скоростного режима разлива стали на качество сортовой непрерывнолитой заготовки // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 4. С. 460–464.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-4-460-464

EFFECT OF STEEL CASTING SPEED MODE ON QUALITY OF CONTINUOUSLY CASTED BILLET

*A. M. STOLYAROV, HD (Tech), Prof., Dpt "Metallurgy and chemical technologies", sam52.52@mail.ru;
A. M. RETUNSKAYA, undergraduate, Dpt "Foundry processes and material science";
M. G. POTAPOV, PhD (Tech), Prof. Ass., Dpt "Foundry processes and material science";
M. V. POTAPOVA, PhD (Tech), Dpt "Metallurgy and chemical technologies"
(Institute of metallurgy, machine building and material processing, Magnitogorsk State technical University after G.I. Nosov,
Russia, Chelyabinsk rgn., Magnitogorsk)*

Abstract. The speed of billet withdrawal from a continuous caster (CC) mold has a decisive effect on the CC productivity. However, increase of the speed results in an increase of pollution of the CC metal by non-metallic inclusion and increase of surface defects of CC billet. Estimation of steel casting speed mode impact on the degree of different defects formation presented for long products CC billets, casted at a five-strand CC of radial type. Defects of CC billet from СтЗсп steel grade studied for a billet having section of 150×150 mm. The purpose of the study was to determine the degree of influence of withdrawal speed, metal chemical composition and billets cross section dimensions on billets quality. Array of industrial data of more than 550 billets studied, 80.4% of which were casted by an open stream and the balance – by a closed stream. As a result of the CC billets quality study it was confirmed, that during metal casting by an open stream the degree of evolution of form defect, like rhombic defects, internal and surface defects is higher comparing with those when casting by a closed stream. General tendency of increase of the CC metal pollution by non-metallic inclusions at the increase of billet withdrawal speed. The tendency is similar for both casting by an open and by a closed stream. However, during casting by an open stream the increase takes place rather evenly. During casting by a closed

stream a sharp increase of billets with defects were observed at the billets withdrawal speed exceeding 2.4 m/min. Linear dependencies of billets withdrawal speed while casting by a closed stream on the degree of liquation cracks evolution and general strips, edge point pollutions and peripheral fine structure metal zone thickness determined. To improve the long products billets surface, casted by a closed stream, it was recommended to restrict the withdrawal speed of the billet from a carbon steel of general quality by the value of 2.4 m/min.

Key words: continuous casting of steel, long products continuous caster, casting by an open and by a closed stream, steel continuous casting speed, pollution of continuously casted metal by non-metallic inclusions.

For citation. Stolyarov A.M., Retunskaya A.M., Potapov M.G., Potapova M.V. Effect of steel casting speed mode on quality of continuously casted billet. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 4, pp. 460–464. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-4-460-464

В ранее проведенных исследованиях [1–3] авторами изучено влияние на скорость вытягивания сортовых заготовок различных параметров непрерывной разливки стали на пятиручьевой МНЛЗ радиального типа. Рассмотрено влияние химического состава металла, величины его перегрева в промежуточном ковше над температурой ликвидус, способа заливки металла из промежуточного ковша в кристаллизаторы, размеров поперечного сечения отливаемой заготовки. Установлено, что скорость вытягивания заготовок сечением 150×150 мм из высокоуглеродистой и среднеуглеродистой стали в среднем на 14 и 7 % (отн.) соответственно ниже, чем отливок из низкоуглеродистой стали. Увеличение перегрева стали СтЗсп на 20 °С вызывает уменьшение скорости вытягивания заготовки сечением 150×150 мм при разливке металла открытой и закрытой струей в среднем на 12 и 10 % (отн.) соответственно. Изменение размеров поперечного сечения сортовых заготовок от 150×150 до 152×170 мм ведет к снижению средней скорости вытягивания заготовок на 7 % (отн.). Известно [4–7], что скорость вытягивания заготовок из кристаллизатора оказывает решающее влияние на производительность МНЛЗ, однако ограничивающими факторами являются стабильность процесса разливки и качество отливаемых заготовок. В данной работе оценивается влияние скоростного режима разливки стали на степень развития различных дефектов сортовой непрерывнолитой заготовки.

С целью устранения влияния на величину скорости вытягивания заготовки химического состава металла и размеров поперечного сечения заготовки была исследована сталь только одной марки — СтЗсп, разлитая на заготовки одинакового сечения — 150×150 мм. В работе изучен массив из 581 заготовки, большая часть которых (80,4 %) была отлита открытой струей, а остальные — закрытой. Данные о химическом составе металла и параметрах температурно-скоростного режима приведены в табл. 1.

**ТАБЛИЦА 1. УСРЕДНЕННЫЕ ДАННЫЕ
ИССЛЕДОВАННОГО МЕТАЛЛА**

**TABLE 1. THE AVERAGED DATA OF THE
STUDIED METAL**

Параметр	Значение*
Число заготовок	467/114
Химический состав металла, %:	
углерод	0,19/0,17
кремний	0,19/0,21
марганец	0,61/0,51
сера	0,012/0,005
фосфор	0,011/0,010
азот	0,008/0,007
алюминий	0,002/0,013
Температура ликвидус, °С	1515/1517
Температура металла в промежуточном ковше, °С	1546/1549
Скорость вытягивания заготовки, м/мин	2,35/2,36
* Числитель — открытая струя, знаменатель — закрытая струя.	

Химический состав металла при разливке разными способами различался незначительно, за исключением содержания двух элементов: серы и алюминия. Отличие в содержании алюминия объясняется тем, что при разливке открытой струей содержание этого элемента не должно превышать 0,006 % для уменьшения зарастания калиброванных отверстий небольшого диаметра разливочных стаканов оксидными неметаллическими включениями. Параметры температурно-скоростного режима разливки стали открытой и закрытой струей были практически одинаковы.

Результаты оценки качества макроструктуры отлитых сортовых заготовок представлены в табл. 2.

Степень развития всех дефектов макроструктуры сортовой заготовки, отлитой открытой струей, сильнее, чем при разливке закрытой струей. Это объясняется негативным влиянием контакта расплава с атмосферным воздухом и более высоким содержанием серы в разливаемом металле.

**ТАБЛИЦА 2. КАЧЕСТВО МАКРОСТРУКТУРЫ
СОРТОВЫХ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК**

**TABLE 2. THE QUALITY OF MACROSTRUCTURE
OF BILLETS**

Вид дефекта	Степень развития дефекта*, балл
Центральная пористость	1,3/1,2
Осевая ликвация	1,1/1,0
Ликвационные трещины и полосы общие	1,1/0,4
Ликвационные трещины и полосы осевые	0,4/0,2
Ликвационные трещины и полосы угловые	0,4/0,1
Краевые точечные загрязнения	1,5/0,3
Газовые пузыри внутренние	0,07 / 0,01
Газовые пузыри поверхностные	0,28 / 0,04

* Числитель — открытая струя, знаменатель — закрытая струя.

При изучении внутреннего строения заготовок также оценивалась толщина периферийной зоны металла с мелкозернистой структурой, средняя величина которой при разливке открытой (408 заготовок) и закрытой (95 заготовок) струей равнялась 3,7 и 3,1 мм соответственно.

Средняя ромбичность заготовки, отлитой открытой струей, составила 4,1 мм по сравнению с 1,8 мм при наполнении кристаллизатора закрытой струей.

Качество поверхности литого металла оценивалось путем подсчета заготовок, имевших различные поверхностные дефекты: трещины продольные, поперечные, сетчатые; надавы, ужины, царапины, поры. Преобладающим дефектом поверхности являлись поры размером от 0,5 до 1,5 мм.

Корреляционно-регрессионный анализ массива производственных данных позволил выявить при разливке металла закрытой струей возрастающую линейную зависимость степени развития ликвационных трещин и полосок общих (ЛТП_{общ}, баллы) от скорости вытягивания заготовки (w , м/мин) следующего вида:

$$\text{ЛТП}_{\text{общ}} = 1,16w - 2,29, r = 0,327, r_{0,001} = 0,321. \quad (1)$$

Зависимость (1) статистически значима с вероятностью 99,9 %, она представлена на рис. 1 в виде гистограммы.

В результате исследования установлена общая тенденция роста загрязненности литого металла неметаллическими включениями с возрастанием скорости вытягивания заготовки при разливке стали как открытой, так и закрытой струей (рис. 2).

Рис. 1. Зависимость степени развития ликвационных трещин и полосок общих от скорости вытягивания сортовой заготовки, отлитой закрытой струей: цифры внутри столбиков — число изученных заготовок

Fig. 1. Dependence of the degree of evolution of liquation cracks and strips on the withdrawal speed of the billet, casted by closed stream: numbers inside columns is the quantity of studied billets

Рис. 2. Изменение степени развития краевых точечных загрязнений в сортовой непрерывнолитой заготовке, отлитой открытой и закрытой струей с разной скоростью

Fig. 2. Change in the degree of evolution of edge point pollution in the CC billet, casted by open and closed stream with different speeds

Отличием является то, что статистически значимая зависимость между степенью развития краевых точечных загрязнений (КТЗ, баллы), характеризующей уровень загрязненности металла неметаллическими включениями, и скоростью вытягивания заготовки (w , м/мин) наблюдалась только для разливки стали закрытой струей:

$$\text{КТЗ} = 0,77w - 1,47, r = 0,245, r_{0,02} = 0,230. \quad (2)$$

Линейная зависимость (2) существует с вероятностью 98 %.

При увеличении скорости вытягивания заготовки снижается толщина периферийной зоны металла с мелкокристаллической структурой в сортовой заготовке при любом способе разливки стали (рис. 3).

Рис. 3. Влияние скорости вытягивания сортовой заготовки, отлитой открытой и закрытой струей, на толщину периферийной зоны металла с мелкозернистой структурой

Fig. 3. The effect of withdrawal speed of billet, casted by open and closed streams, on peripheral zone thickness of a metal with a fine-grained structure

Для условий разливки металла закрытой струей получена линейная зависимость толщины зоны металла с мелкозернистой структурой (δ , мм) от скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора (w , м/мин):

$$\delta = 9,56 - 2,74w, r = -0,287, r_{0,01} = 0,258. \quad (3)$$

На рис. 4 показано изменение относительного количества заготовок с поверхностными дефек-

тами, отлитых открытой и закрытой струей с разной скоростью. При этом минимальное количество сортовых заготовок, имевших на поверхности дефекты, было условно принято за единицу.

Рис. 4. Изменение относительного количества заготовок с поверхностными дефектами, отлитых открытой и закрытой струей с разной скоростью

Fig. 4. The change in the relative number of billets with surface defects casted by open and closed streams at different speeds

Из рис. 4 видно, что большее количество дефектов на поверхности сортовых заготовок наблюдается при разливке стали открытой струей. Для обоих способов разливки с увеличением скорости вытягивания заготовок растет и относительное количество отливок с поверхностными дефектами. Различие заключается в том, что при разливке открытой струей этот рост происходит довольно равномерно, а при разливке стали закрытой струей наблюдается резкое увеличение числа отливок с дефектами при увеличении скорости вытягивания заготовок более 2,4 м/мин.

Заключение

В результате исследования качества сортовых непрерывнолитых заготовок сечением 150×150 мм из стали СтЗсп подтверждено, что при разливке металла открытой струей степень развития дефекта формы в виде ромбичности, внутренних и поверхностных дефектов выше, чем при разливке закрытой струей. Рост скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора ведет к увеличению загрязненности литого металла неметаллическими включениями и количества поверхностных дефектов при любом спо-

собе разливки. В работе выявлены линейные зависимости степени развития ликвационных трещин и полосок общих, краевых точечных загрязнений и толщины периферийной зоны металла с мелкокристаллической структурой от скорости вытягивания заготовки для условий разливки стали закрытой струей. Для улучшения в первую очередь качества поверхности сортовых заготовок, отлитых закрытой струей, рекомендуется ограничить скорость вытягивания заготовок из кристаллизатора величиной 2,4 м/мин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ретунская А.М., Столяров А.М., Потапов М.Г. Влияние различных факторов на скорость вытягивания сортовой непрерывнолитой заготовки // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. — Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2017. Вып. 16. С. 38–43.
2. Столяров А.М., Ретунская А.М., Потапов М.Г., Мошкуннов В.В. Анализ скоростного режима разливки стали на сортовой МНЛЗ // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 4 (1420). С. 79–82.
3. Ретунская А.М., Столяров А.М., Потапов М.Г. Скоростной режим разливки стали на сортовой МНЛЗ // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й междунар. науч.-техн. конф. — Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2018. Т. 1. С. 102.
4. Ботников С.А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла. — Волгоград: Панорама, 2011. — 97 с.
5. Столяров А.М., Селиванов В.Н. Технологические расчеты по непрерывной разливке стали. — Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. — 67 с.
6. Столяров А.М., Селиванов В.Н. Технология непрерывной разливки стали. — Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ, 2009. — 78 с.
7. Либерман А.Л. Дефекты непрерывнолитых заготовок // Электromеталлургия. 2006. № 3. С. 20–25.

Поступила 15 января 2019 г.

REFERENCES

1. Retunskaya A.M., Stolyarov A.M., Potapov M.G. *Vliyanie razlichnykh faktorov na skorost' vytyagivaniya sortovoi nepreryvnolitoi zagotovki* [Effect of different factors on CC billet withdrawal speed]. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialoobrabotki* [Technologies of metallurgy, engineering and material processing]. Magnitogorsk: izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2017, no. 16, pp. 38–43. (In Russ.).
2. Stolyarov A.M., Retunskaya A.M., Potapov M.G., Moshkunov V.V. Analysis of speed mode of steel casting at a long products continuous caster. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 4 (1420), pp. 79–82. (In Russ.).
3. Retunskaya A.M., Stolyarov A.M., Potapov M.G. *Skorostnoi rezhim razlivki stali na sortovoi MNLZ* [Speed mode of casting at a long products continuous caster]. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 76-i mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Actual problems of modern science, technology and education: Abstracts of the 76th Intern. scientific and technical conf.]. Magnitogorsk: izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2018, vol. 1, p. 102. (In Russ.).
4. Botnikov S.A. *Sovremenniy atlas defektov nepreryvnolitoi zagotovki i prichiny vozniknoveniya proryvov kristallizuyushcheysya korochki metalla* [Modern atlas of defects of continuously casted billet and reasons of breaks occurrence in the crystallizing metal shell]. Volgograd: Panorama, 2011, 97 p. (In Russ.).
5. Stolyarov A.M., Selivanov V.N. *Tekhnologicheskie raschety po nepreryvnoi razlivke stali* [Technological calculations for steel continuous casting]. Magnitogorsk: izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2011, 67 p. (In Russ.).
6. Stolyarov A.M., Selivanov V.N. *Tekhnologiya nepreryvnoi razlivki stali* [Technology of steel continuous casting]. Magnitogorsk: GOU VPO MGTU, 2009, 78 p. (In Russ.).
7. Liberman A.L. Defects of continuously casted billets. *Elektrometallurgiya*, 2006, no. 3, pp. 20–25. (In Russ.).

Received 15 January 2019