

Щитиков А.А., Засов Н.Е., Столяров А.М., Юдин Д.В.

ОСОБЕННОСТИ РАЗЛИВКИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ НА СЛЯБОВЫХ МНЛЗ КРИВОЛИНЕЙНОГО ТИПА

Аннотация. В работе проведен статистический анализ массива производственных данных из 28-ми плавов разливки низкоуглеродистой легированной стали марки 10ХНДП на слябовых МНЛЗ криволинейного типа. Отливались слябы одинаковой толщины 250 мм и разной ширины: 1030, 1080 и 1270 мм (четырёхручьевого режим разливки) и 1450, 1560, 1650 мм (двухручьевого режим).

Использование двухручьевого режима разливки было преобладающим – в 71,4 % случаев. Самой востребованной оказалась ширина сляба 1650 мм (39,3 % заготовок). По результатам химического анализа металла 77-ми проб рассчитана температура ликвидус стали, изменявшаяся в интервале от 1516 до 1519 °С. Приведены усредненные данные о параметрах температурно-скоростного режима разливки металла: температуре стали перед разливкой, перегреве металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус, скорости вытягивания сляба из кристаллизатора. В результате корреляционно-регрессионного анализа выявлены статистически значимые убывающие линейные зависимости скорости вытягивания сляба из кристаллизатора от перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус. Установлено, что определяющим фактором высокой эффективности разливки являются конструктивные особенности МНЛЗ криволинейного типа – количество ручьев для отливки слябов. Для четырёхручьевого режима разливки средние значения суммарной весовой скорости разливки и продолжительности разливки металла одной плавки примерно в 1,5 раза выгодно отличаются от аналогичных показателей двухручьевого режима. Наибольшая суммарная весовая скорость разливки и наименьшая продолжительность разливки металла одной плавки стали марки 10ХНДП достигнуты при отливке слябов сечением 250×1270 мм в четыре ручья.

Ключевые слова: сталь, разливка, МНЛЗ, технология, параметры

В качестве традиционной низкоуглеродистой легированной стали [1] выбрана конструкционная сталь марки 10ХНДП. Легированная хромоникеле-фосфористая с медью сталь применяется в строительстве и машиностроении. Она отличается неограниченной свариваемостью и повышенной стойкостью против атмосферной коррозии изделий, эксплуатирующихся на открытом воздухе без дополнительных средств защиты от коррозии. Листовой прокат из этой стали обычно представляет собой горячекатаные листы толщиной от 5 до 9 мм.

В соответствии с требованиями ГОСТ 19281-2014 сталь марки 10ХНДП должна иметь следующий химический состав, мас. %:

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	N
0,08–0,12	0,17–0,37	0,30–0,60	≤ 0,020	0,07–0,12	0,5–0,8	0,3–0,6	0,3–0,5	0,08–0,15	≤ 0,008

Отличительной особенностью этой стали является повышенное содержание фосфора, обычно считающегося вредной примесью, и алюминия наряду с хромом, никелем и медью.

Непрерывная разливка стали марки 10ХНДП осуществляется на слябовых МНЛЗ криволинейного типа [2].

В работе проведен статистический анализ массива производственных данных из 28-ми плавов.

Разливка стали производилась на слябовых МНЛЗ №1–4 криволинейного типа [3–5], конструктивно различающихся тем, что МНЛЗ №1 и 4 являются комбинированными с возможностью работы как в двух-, так и в четырёхручьевом режимах, в то время

как МНЛЗ №2 и 3 – машины с постоянными четырьмя ручьями. Сведения о количестве плавов стали марки 10ХНДП, разлитой на разных машинах, представлены на рис. 1.

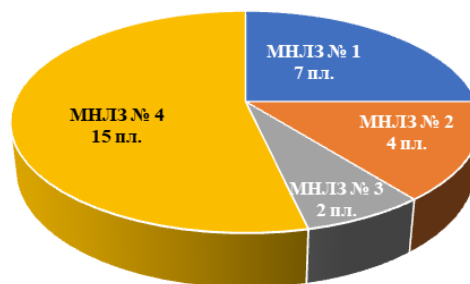


Рис. 1. Данные о количестве металла, разлитого на разных МНЛЗ (указаны номер МНЛЗ и число плавов)

Из рис. 1 видно, что наибольшее количество металла было разлито на МНЛЗ №4 – 15 плавов или 53,6% от общего количества. На машинах №1–3: 7 плавов (25%), 4 плавки (14,3%) и 2 плавки (7,1%) соответственно.

Отливались слябы одинаковой толщины 250 мм и разной ширины: 1030, 1080 и 1270 мм (четырёхручьевого режим разливки) и 1450, 1560, 1650 мм (двухручьевого режим). Данные о количестве плавов с отливкой слябов разной ширины приведены на рис. 2.

Использование двухручьевого режима разливки было преобладающим – в 71,4% случаев. Самой востребованной оказалась ширина сляба 1650 мм (39,3% заготовок).

Информация о среднем химическом составе стали марки 10ХНДП приведена на рис. 3.

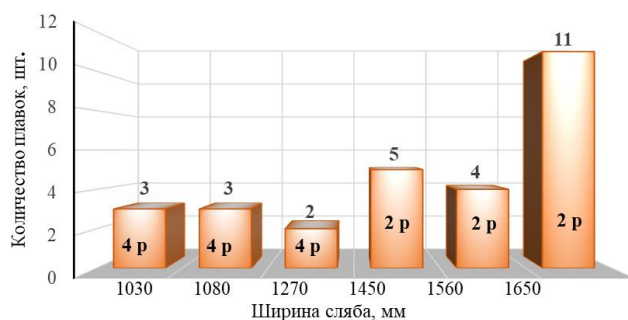


Рис. 2. Количество плавки металла с отливкой слэбов разной ширины по двухручьевому (2 п) и четырехручьевому (4 п) режимам

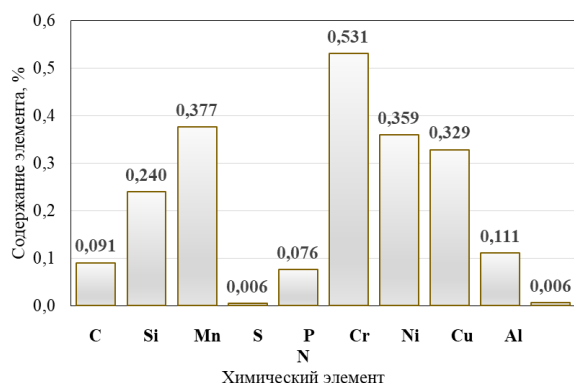


Рис. 3. Средний химический состав стали марки 10ХНДП

Содержание химических элементов полностью соответствовало требованиям ГОСТ 19281-2014.

С использованием формулы

$$t_{\text{ликв}} = 1536,6 - 86 \cdot [C] - 8 \cdot [Si] - 5 \cdot [Mn] - 25 \cdot [S] - 30 \cdot [P] - 1,5 \cdot [Cr] - 4 \cdot [Ni] - 5 \cdot [Cu] - 5 \cdot [Al] - 90 \cdot [N] \quad (1)$$

и результатов химического анализа металла 77-ми проб рассчитана температура ликвидус стали (рис. 4). Из рис. 4 следует, что температура ликвидус изменялась в достаточно узком диапазоне – от 1516 до 1519°C, что свидетельствует о примерном постоянстве химического состава металла и в среднем равнялась 1517,5°C.

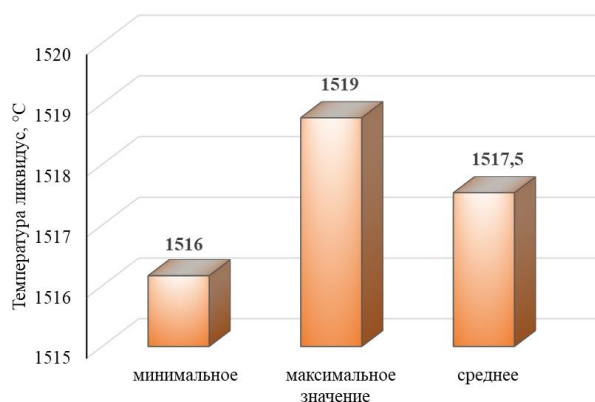


Рис. 4. Расчетные значения температуры ликвидус стали

Усредненные данные о параметрах температурно-скоростного режима разливки металла: перегреве металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус и линейной скорости вытягивания слэба из кристаллизатора (скорости разливки) представлены в таблице.

Усредненные значения параметров температурно-скоростного режима разливки стали марки 10ХНДП

Параметр	Режим разливки					
	Двухручьевой			Четырехручьевой		
Количество данных, шт.	53	53	23	23	23	23
Перегрев металла, °C	мин.	18	14			
	макс.	36	33			
	ср.	28	28			
Скорость разливки, м/мин	мин.	0,58	0,57	0,56	0,56	0,59
	макс.	0,84	0,85	0,81	0,81	0,81
	ср.	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69

Температура стали марки 10ХНДП перед разливкой изменялась в интервале от 1532 до 1554°C. Значения параметров температурно-скоростного режима разливки для двухручьевого и четырехручьевого вариантов являются очень близкими. Можно отметить лишь небольшое (примерно на 0,01 м/мин) превышение средней скорости разливки металла при четырехручьевом режиме. Зависимости скорости разливки металла для двух- и четырехручьевого режимов от перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус показаны на рис. 5 и 6.

Линейные убывающие зависимости описываются следующими уравнениями:

$$v = 0,8248 - 0,0061 \cdot \Delta t, n=106, r = -0,4937, r_{0,001} = 0,3211; \quad (2)$$

$$v = 0,8876 - 0,0075 \cdot \Delta t, n=92, r = -0,6711, r_{0,001} = 0,3379. \quad (3)$$

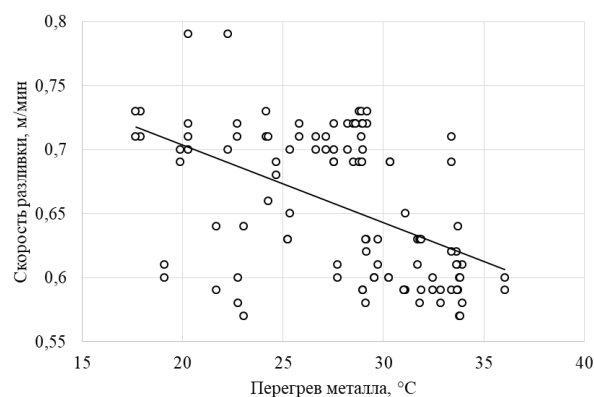


Рис. 5. Зависимость скорости разливки металла в два ручья от перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус

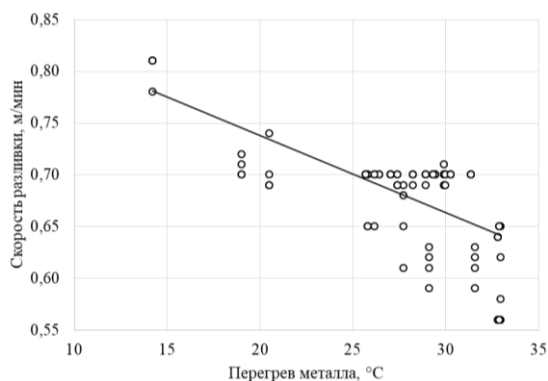


Рис. 6. Зависимость скорости разливки металла в четыре ручья от перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус

Сравнение расчетных значений коэффициентов парной корреляции (r), взятых по модулю, с их критическими значениями (r_{α}), зависящими от количества данных (n) и выбранного уровня ошибки ($\alpha=0,001$) [6], показывает, что выявленные зависимости являются статистически значимыми с вероятностью 99,9%.

Для оценки эффективности разливки металла на МНЛЗ важными параметрами являются суммарная весовая скорость разливки и продолжительность разливки металла одной плавки, сведения о которых представлены на рис. 7 и 8, из которых видно, что определяющим фактором высокой эффективности разливки являются конструктивные особенности МНЛЗ криволинейного типа, а именно количество ручьев для отливки слэбов. Для четырехручьевого режима разливки средние значения суммарной весовой скорости разливки (5,73 т/мин) и продолжительности разливки металла одной плавки (63,5 мин) примерно в 1,5 раза выгодно отличаются от аналогичных показателей для двухручьевого режима (3,87 т/мин и 93,4 мин).

Для получения максимальной суммарной весовой скорости разливки (в среднем 6,7 т/мин) и минимальной продолжительности разливки металла одной плавки (в среднем 54 мин) сталь марки 10ХНДП наиболее предпочтительно разливать на МНЛЗ криволинейного типа в слэбы с размерами поперечного сечения 250×1270 мм в четыре ручья.

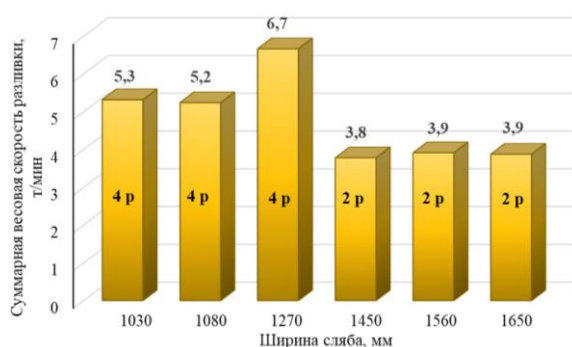


Рис. 7. Средняя суммарная весовая скорость разливки стали марки 10ХНДП

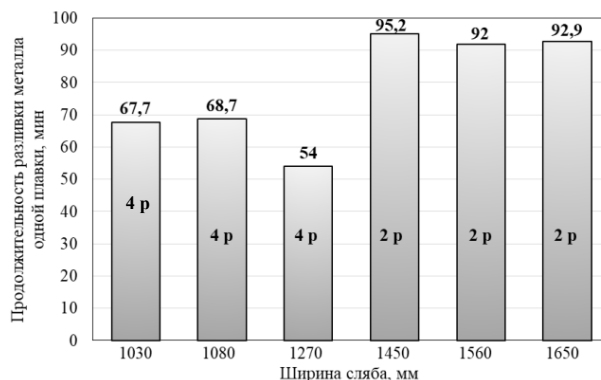


Рис. 8. Средняя продолжительность разливки металла одной плавки при отливке слэбов разной ширины по двухручьевому (2 p) и четырехручьевому (4 p) режимам

Заключение

Особенности разливки низкоуглеродистой легированной стали марки 10ХНДП на слэбовых МНЛЗ криволинейного типа (массив производственных данных из 28 плавки) заключаются в отливке слэбов шириной 1030, 1080 и 1270 мм (четырёхручьевого режим) и 1450, 1560, 1650 мм (двухручьевого режим) при одинаковой толщине заготовки 250 мм.

Двухручьевого режим разливки являлся преобладающим – в 71,4% случаев. Самой востребованной оказалась ширина слэба 1650 мм (39,3% заготовок). Расчетные значения температуры ликвидус изменялись в достаточно узком диапазоне: от 1516 до 1519°C. Сталь перед разливкой имела температуру 1532–1554°C. В результате корреляционно-регрессионного анализа установлены статистически значимые зависимости линейной скорости разливки от перегрева металла в промежуточном ковше МНЛЗ над температурой ликвидус. Лимитирующим фактором высокой эффективности разливки являются конструктивные особенности МНЛЗ криволинейного типа, а именно количество ручьев для отливки слэбов.

Для четырехручьевого режима разливки средние значения суммарной весовой скорости разливки (5,73 т/мин) и продолжительности разливки металла одной плавки (63,5 мин) примерно в 1,5 раза выгодно отличаются от аналогичных показателей двухручьевого режима (3,87 т/мин и 93,4 мин). Максимальная суммарная весовая скорость разливки и минимальная продолжительность разливки металла одной плавки стали марки 10ХНДП достигаются при отливке слэбов с размерами поперечного сечения 250×1270 мм в четыре ручья.

Список источников

1. Иванников Е.В. Конструкционные стали и сплавы для заданных изделий. Липецк: Издательство Липецкого государственного технического университета, 2017. 83 с.

2. Паршин В.М., Буланов Л.В. Непрерывная разливка стали. Липецк: ОАО «НЛМК», 2011. 221 с.
3. Столяров А.М., Селиванов В.Н. Непрерывная разливка стали. Машины непрерывного литья заготовок. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 192 с.
4. О способах воздействия на процесс формирования стальной непрерывнолитой заготовки / Сомнат Басу, А.М. Столяров, М.В. Потапова, С.В. Дидович // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1 (45). С. 24–27.
5. Столяров А.М., Потапов И.М., Юдин Д.В. Качество непрерывнолитого металла, разлитого разными способами // Теория и технология металлургического производства. 2024. №3 (50). С. 4–8.
6. Кнотек М., Войта Р., Шефц И. Анализ металлургических процессов методами математической статистики. М.: Металлургия, 1968. 212 с.

Сведения об авторах

Щитиков Александра Андреевич – магистрант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Засов Никита Евгеньевич – аспирант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Столяров Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: sam52.52@mail.ru

Юдин Данил Владиславович – магистрант кафедры металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PECULIARITIES OF CASTING LOW-CARBON ALLOY STEEL ON SLABS OF CURVED TYPE

Shchitikov Alexander A. – postgraduate student of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Zasov Nikita E. – postgraduate student of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Stolyarov Alexander M. – ScD, professor of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sam52.52@mail.ru

Yudin Danil V. – postgraduate student of the metallurgy and chemical technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstracts. Statistical analysis of an array of production data from 28 castings of low-carbon alloyed steel of grade 10KhNDP on slabs of curved type. Slabs of the same thickness of 250 mm and different widths were cast: 1030, 1080 and 1270 mm (four-stream casting mode) and 1450, 1560, 1650 mm (two-stream mode). The use of a two-stream casting mode was predominant – in 71.4% of cases. The most popular was the slab width of 1650 mm (39.3% of the blanks). Based on the results of chemical analysis of the metal of 77 samples, the liquidus temperature of steel was calculated, which varied in the interval from 1516 to 1519 °C. Averaged data on parameters of temperature-speed mode of metal casting are given: steel temperature before casting, metal overheating in intermediate ladle of continuous casting machine above liquidus temperature, speed of slab drawing from crystallizer. As a result of correlation and regression analysis, statistically significant decreasing linear dependences of the rate of pulling the slab out of the crystallizer on the overheating of the metal in the intermediate ladle of the CCM above the liquidus temperature were revealed. It has been established that the determining factor of high casting efficiency is the design features of curved-type castings - the number of slabs casting streams. For a four-way casting mode, the average values of the total casting speed and the duration of casting the metal of one melt approximately 1.5 times favorably differ from similar indicators of a two-way mode. The highest sum-mare casting speed and the shortest duration of metal casting of a single melt of steel of grade 10KhNDP were achieved when casting slabs with a cross-section of 250 × 1270 mm in four streams.

Keywords: steel, casting, continuous casting machine, technology, parameters

References

1. Ivannikov E.V. Structural steels and alloys for specified products. Lipetsk: Publishing House of Lipetsk State Technical University, 2017. 83 pp.
2. Parshin V.M., Bulanov L.V. Continuous steel casting. Lipetsk: NLMK, 2011. 221 pp.
3. Stolyarov A.M., Selivanov V.N. Continuous steel casting. Continuous casting machines. Moscow; Volgda: Infra-Engineering, 2020. 192 p.
4. On methods of influencing the process of forming a steel continuously cast billet / Doubted Basu, A.M. Stolyarov, M.V. Potapova, S.V. Didovich // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. 2014. №1 (45). S. 24-27.
5. Stolyarov A.M., Potapov I.M., Yudin D.V. Quality of continuously cast metal spilled in different ways//Theory and technology of metallurgical production. 2024. №3 (50). S. 4-8.
6. Knotek M, Vojta R, Schefz I. Analysis of metallurgical processes by methods of mathematical statistics. M.: Metallurgy, 1968. 212 pp.

Ссылка на статью:

Особенности разливки низкоуглеродистой легированной стали на слябовых МНЛЗ криволинейного типа / Щитиков А.А., Засов Н.Е., Столяров А.М., Юдин Д.В. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №2(57). С. 11-15. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-11-15](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-11-15)

Shchitikov A.A., Zasov N.E., Stolyarov A.M., Yudin D.V. Peculiarities of casting low-carbon alloy steel on slabs of curved type. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 57, no. 2, pp. 11-15. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-11-15](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-11-15)