

The results of investigation by influence of pouring speed on water discharge in the zone of primary and secondary cooling of slab billets in conditions of modern MNLZ are presented.

И. А. ТРУСОВА, П. Э. РАТНИКОВ, Д. В. МЕНДЕЛЕВ, С. В. КОРНЕЕВ, БНТУ,
А. В. МАТОЧКИН, ГНПО «Белстанкоинструмент»

УДК 669.041

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ВЫТЯГИВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО СЛЯБОВОГО СЛИТКА НА УСЛОВИЯ ЕГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Несмотря на постоянный рост производства в металлургическом комплексе, отечественные предприятия импортируют около 5 млн. т металлопродукции, которая не производится в республике [1]. Одним из таких видов является полосовой прокат, широко используемый в различных отраслях промышленности. В [1] приведены перспективные направления развития металлургического производства, включая создание собственного листопрокатного производства. В связи с этим актуальны исследования, направленные на изучение закономерностей теплового состояния при производстве плоских заготовок на слябовых МНЛЗ.

В статье представлены результаты исследования влияния скорости разливки на расход воды в зоне первичного (кристаллизатор) и вторичного (ЗВО) охлаждения слябовых заготовок в условиях современных МНЛЗ.

Для расчетов процессов кристаллизации слябовых слитков использована математическая модель затвердевания расплава с учетом начального перегрева металла, постановка и реализация которой методом «эквивалентных источников» подробно приведена в [2]. Данная математическая модель была приспособлена для расчета процессов кристаллизации металла на МНЛЗ путем установки взаимоднозначных зависимостей тепловых потоков или коэффициентов теплоотдачи (критерия Bi в модели [2]) от скорости разливки (скорости вытягивания непрерывного слитка) и расходов воды в кристаллизаторе и ЗВО.

Тепловые потоки от металла на стенки кристаллизатора аппроксимированы формулами [3]:

• средний тепловой поток от металла на кристаллизатор:

$$q_{cp} = 1,9 \cdot 10^6 \exp[-0,365L_{кр}] - 1,96 \cdot 10^6 \exp[-2,69v]; \quad (1)$$

• изменение интенсивности теплоотвода в нижней части кристаллизатора:

$$q = [\exp(-3,26 + 4\tau) + \exp(0,921 - 2,24\tau)]q_{cp}, \quad (2)$$

где $L_{кр}$ – длина кристаллизатора, м; v – скорость разливки слитка, м/мин; τ – время нахождения металла в кристаллизаторе, мин.

Зависимость суммарного коэффициента теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения от расхода воды принималась согласно [4] и находится в пределах 180–600 Вт/(м²·К) при расходе охлаждающей воды от 0 до 8 м³/(м²·ч).

При выполнении расчетов рассматривали процесс затвердевания слябов толщиной 200 мм и шириной 1500 мм, при этом марки стали подразделяли на три группы охлаждения (I группа – углеро-

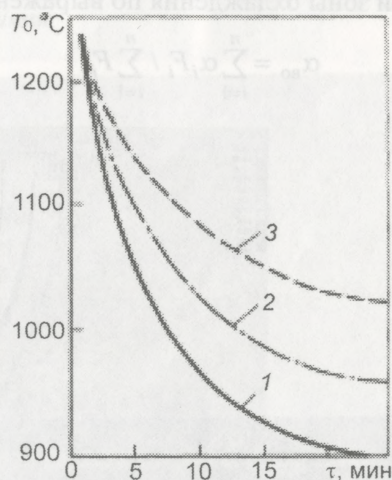


Рис. 1. Рекомендуемое (по данным [3]) изменение во времени температуры поверхности в середине сляба толщиной 200–250 мм в зависимости от группы охлаждения сталей: 1 – углеродистые стали с содержанием углерода до 0,2%; 2 – углеродистые стали с содержанием углерода от 0,2 до 0,4% и низколегированные стали; 3 – стали с содержанием углерода свыше 0,4 %, а также высоколегированные стали

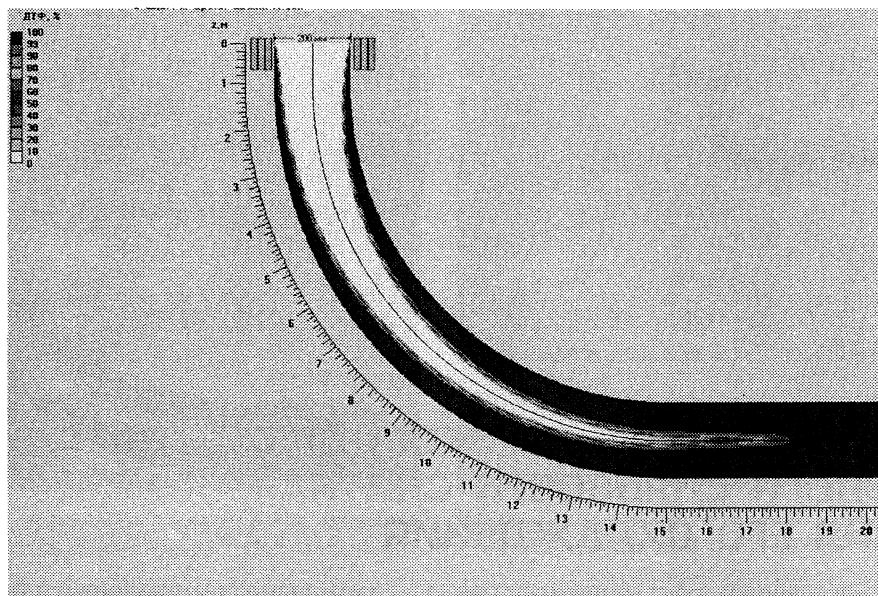


Рис. 2. Кинетика затвердевания сляба толщиной 200 мм из стали 08 сп (I группа охлаждения) при скорости разливки 1 м/мин

дистые стали с содержанием углерода до 0,2%; II группа – углеродистые стали с содержанием углерода от 0,2 до 0,4% и низколегированные стали; III группа – стали с содержанием углерода свыше 0,4 %, а также высоколегированные стали).

Чтобы обеспечить рациональный режим охлаждения непрерывнолитых заготовок определенной группы охлаждения, характеризуемый той или иной температурной кривой (рис. 1), необходимо знать характеристики форсунок, их число и расположение в каждой зоне охлаждения. С учетом локальной неравномерности охлаждения определяли среднеинтегральный коэффициент теплоотдачи для каждой зоны охлаждения по выражению

$$\alpha_{\text{во}} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i F_i}{\sum_{i=1}^n F_i}, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ – количество местных участков охлаждения, отличающихся условиями охлаждения поверхности заготовки; F_i – площадь участков с конкретными условиями охлаждения; α_i – средний коэффициент теплоотдачи на каждом участке.

Значение $\alpha_{\text{во}}$ используется в качестве граничных условий при решении задачи теплопроводности затвердевания непрерывнолитой заготовки на МНЛЗ. Полученное в результате решения температурное поле заготовки (температура центра и поверхности сляба) сравнивается с рекомендуемой температурой (рис. 1) и в случае больших отклонений (более ± 50 °С) производится корректировка в расположении форсунок или регулировка их мощности. Расчеты продолжают до получения совпадений с данными рис. 1.

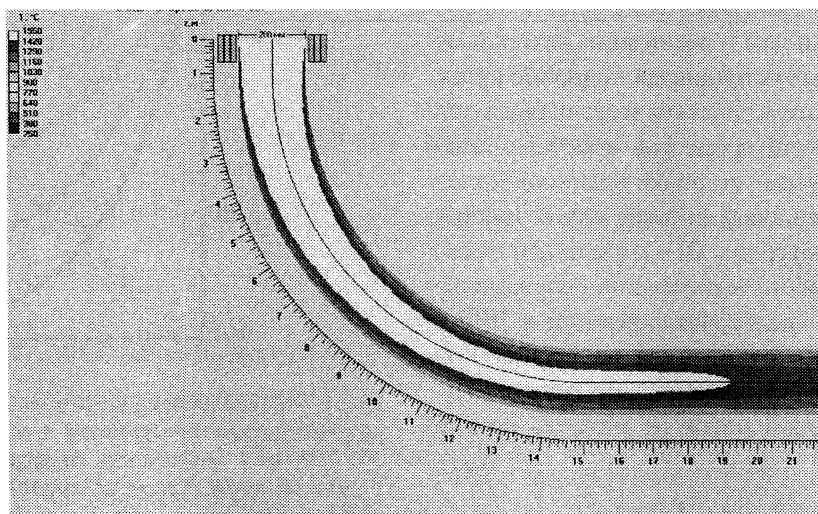


Рис. 3. Распределение температуры по заготовке толщиной 200 мм из стали 08 сп (I группа охлаждения) при скорости разливки 1 м/мин

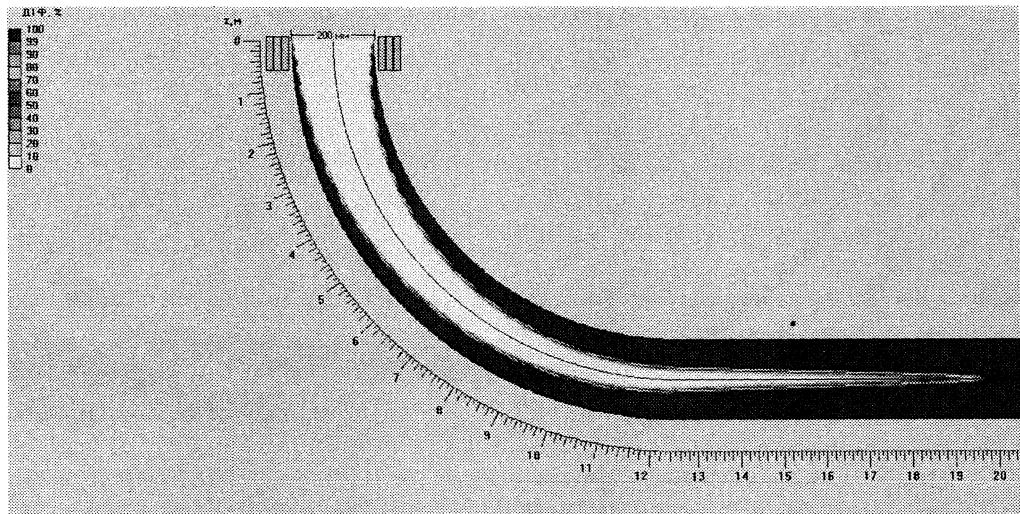


Рис. 4. Кинетика затвердевания сляба толщиной 200 мм из стали 09Г2С (II группа охлаждения) при скорости разливки 1 м/мин

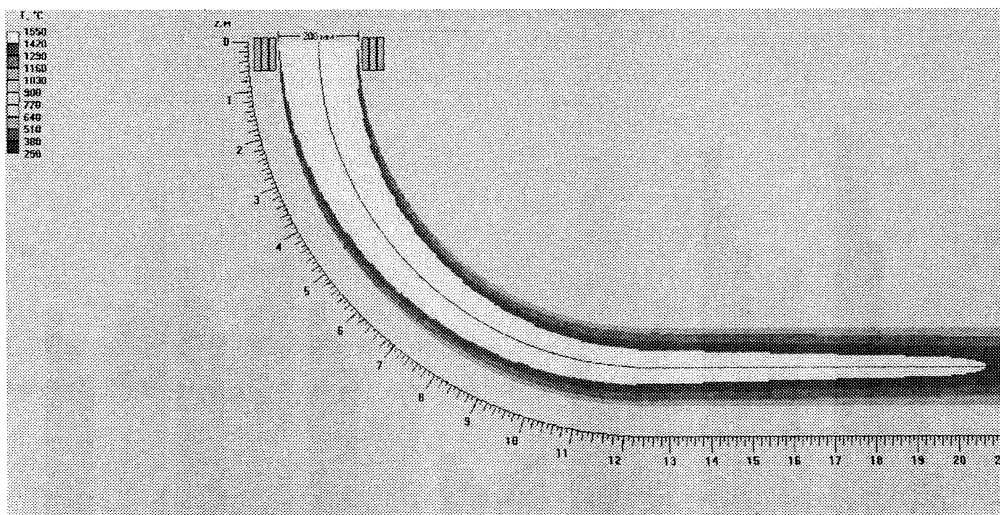


Рис. 5. Распределение температуры по заготовке толщиной 200 мм из стали 09Г2С (II группа охлаждения) при скорости разливки 1 м/мин

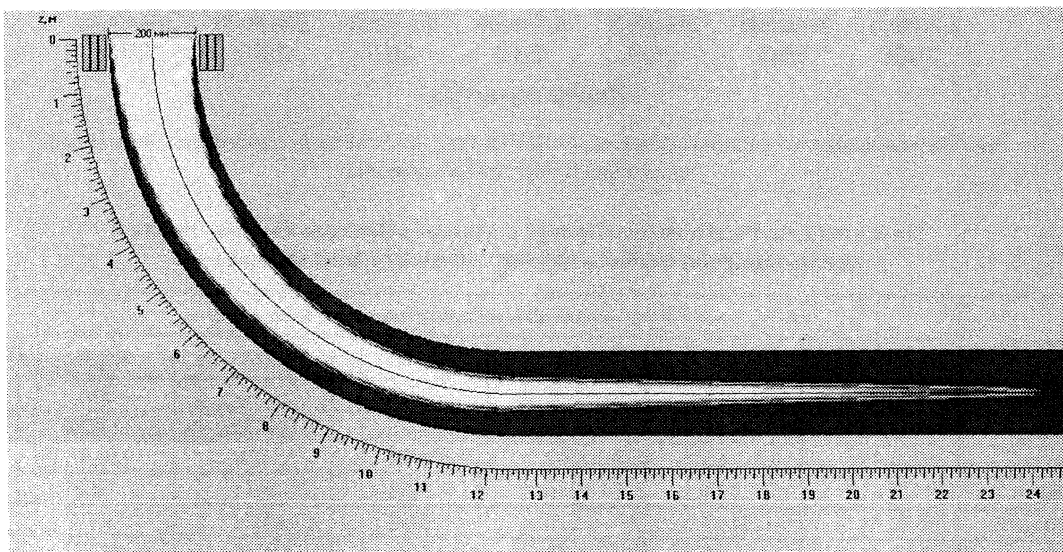


Рис. 6. Кинетика затвердевания сляба толщиной 200 мм из стали 60 (III группа охлаждения) при скорости разливки 1 м/мин

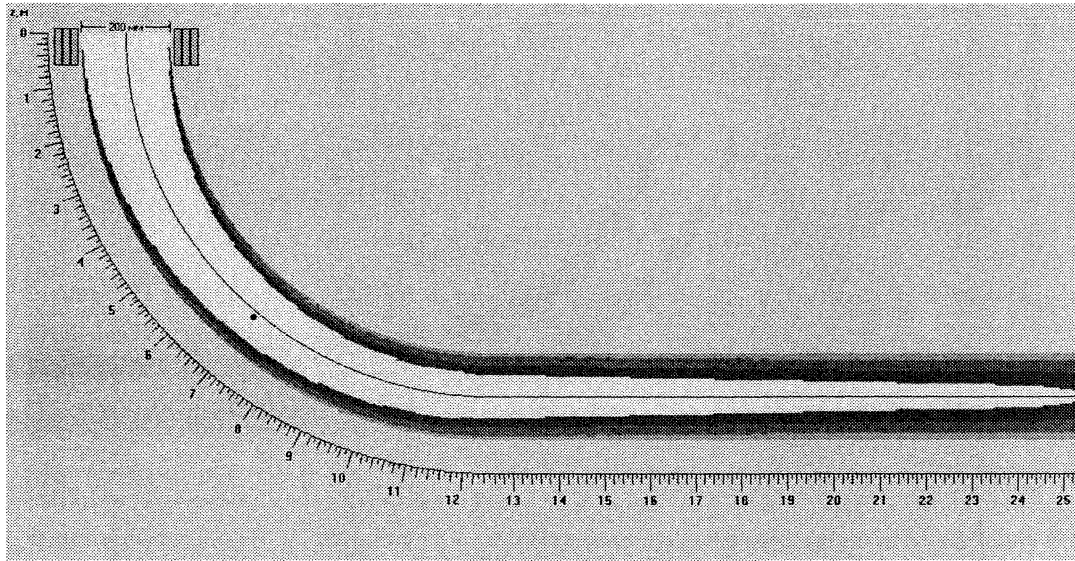


Рис. 7. Распределение температуры по заготовке толщиной 200 мм из стали 60 (III группа охлаждения) при скорости разливки 1 м/мин

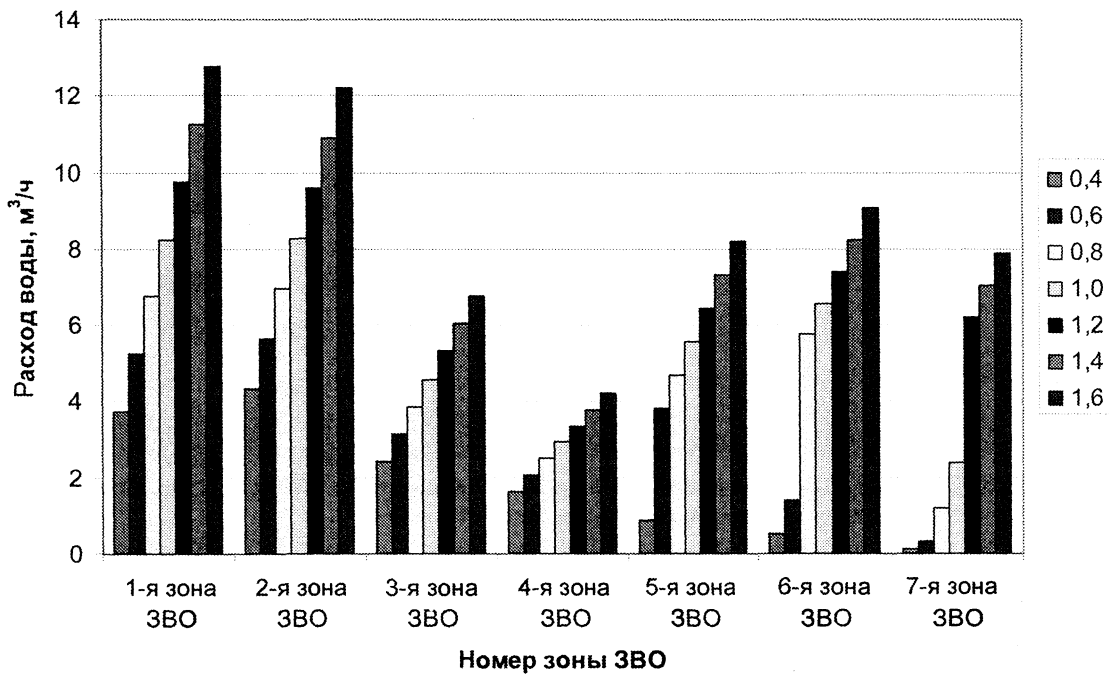


Рис. 8. Расход воды на различных участках ЗВО в зависимости от скорости разливки (м/мин) для сталей I группы охлаждения

Таблица 1. Расход воды в кристаллизаторе и ЗВО (на каждую сторону) при охлаждении слэба толщиной 200 мм I группы охлаждения

Зона охлаждения	Расход воды, м ³ /ч, при скоростях разливки, м/мин						
	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Кристаллизатор	200	280	330	400	460	510	570
1-я зона ЗВО	3,75	5,25	6,75	8,25	9,75	11,25	12,75
2-я зона ЗВО	4,35	5,66	6,97	8,28	9,6	10,91	12,22
3-я зона ЗВО	2,41	3,14	3,86	4,58	5,31	6,03	6,76
4-я зона ЗВО	1,65	2,07	2,5	2,92	3,35	3,77	4,2
5-я зона ЗВО	0,87	3,82	4,68	5,56	6,43	7,31	8,18
6-я зона ЗВО	0,5	1,4	5,75	6,57	7,4	8,22	9,05
7-я зона ЗВО	0,1	0,3	1,2	2,4	6,21	7,03	7,86

Зависимость среднеинтегрального значения коэффициента теплоотдачи при форсуночном охлаждении слабовых заготовок во времени (или по длине МНЛЗ) сечением 200 мм в зависимости от скорости разливки аппроксимировано, согласно [3], следующим выражением:

$$\alpha_{\text{во}} = \exp(4,97 + 0,337v) + \exp(5,36 + 0,592v - 0,21\tau), \quad (4)$$

где v – скорость разливки слитка, м/мин; τ – время нахождения металла в ЗВО, мин.

В зоне воздушного охлаждения суммарный коэффициент теплоотдачи α_{Σ} (излучением и конвекцией) составляет 170–190 Вт/(м²·К).

При расчетах затвердевания слэба толщиной 200 мм выбрана конструкция МНЛЗ криволинейного типа с длиной вертикального участка 1 м и радиусом кривизны 9 м. Длина кристаллизатора

принята равной 0,8 м (рабочая длина 0,65 м и длина мениска 0,15 м), протяженность зоны вторичного охлаждения – 23,4 м. Зона вторичного охлаждения разделена на семь участков: I зона имеет длину 0,3 м, II – 0,9, III – 2,8, IV – 4,2, V – 5,2, VI – 5, VII зона – 5 м. Количество форсуночных полос охлаждения принималось соответственно по зонам – 3, 5, 10, 13, 15, 16, 16. Критерием для определения интенсивности охлаждения и расположения форсунок в зоне первичного и вторичного охлаждения слитка являлось условие полного затвердевания слитка на выходе из ЗВО. Из рис. 1 видно, что заготовки сталей I группы охлаждения должны полностью затвердеть на 25–30% быстрее, чем III группы. В связи с этим подобраны условия охлаждения слэбового слитка толщиной 200 мм таким образом, чтобы металлургическая длина была примерно равна:

для I группы охлаждения – 75 % от длины ЗВО;

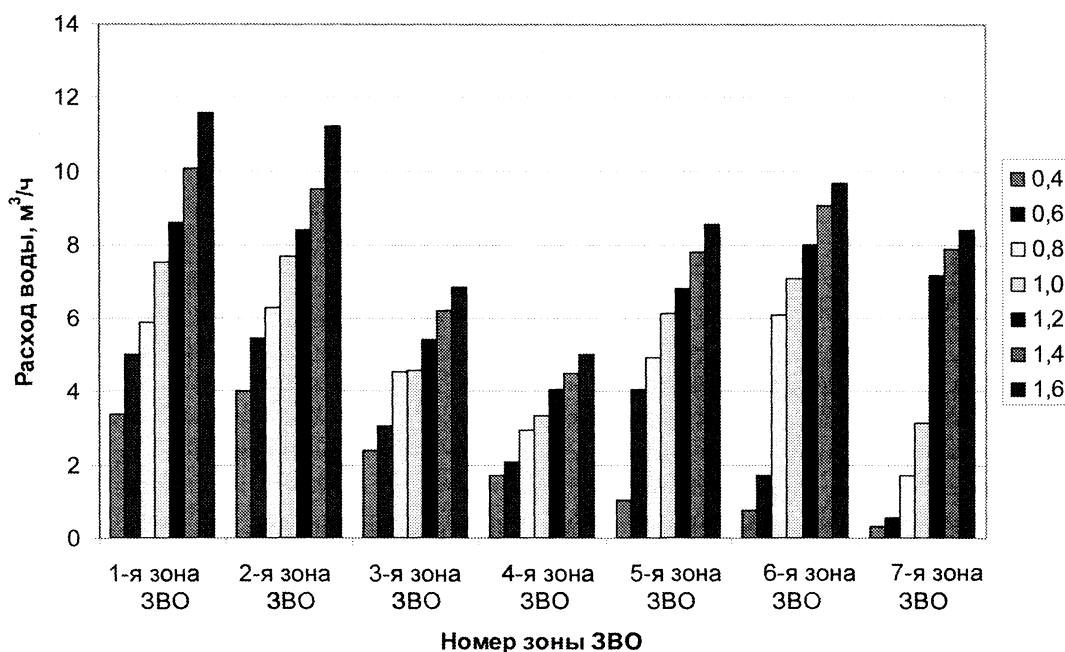


Рис. 9. Расход воды на различных участках ЗВО в зависимости от скорости разливки (м/мин) для сталей II группы охлаждения

Таблица 2. Расход воды в кристаллизаторе и ЗВО (на каждую сторону) при охлаждении слэба толщиной 200 мм II группы охлаждения

Зона охлаждения	Расход воды, м ³ /ч, при скоростях разливки, м/мин						
	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Кристаллизатор	200	280	330	400	460	510	570
1-я зона ЗВО	3,375	5,0	5,875	7,525	8,575	10,075	11,575
2-я зона ЗВО	4,0	5,43125	6,2875	7,66875	8,4	9,50625	11,2125
3-я зона ЗВО	2,40625	3,06875	4,53125	4,59375	5,40625	6,21875	6,83125
4-я зона ЗВО	1,725	2,0625	2,95	3,3375	4,075	4,4875	5,0
5-я зона ЗВО	1,0375	4,0375	4,94375	6,10625	6,81875	7,80625	8,54375
6-я зона ЗВО	0,75	1,7	6,075	7,0875	8,0	9,0625	9,675
7-я зона ЗВО	0,3	0,55	1,7	3,15	7,15625	7,86875	8,38125

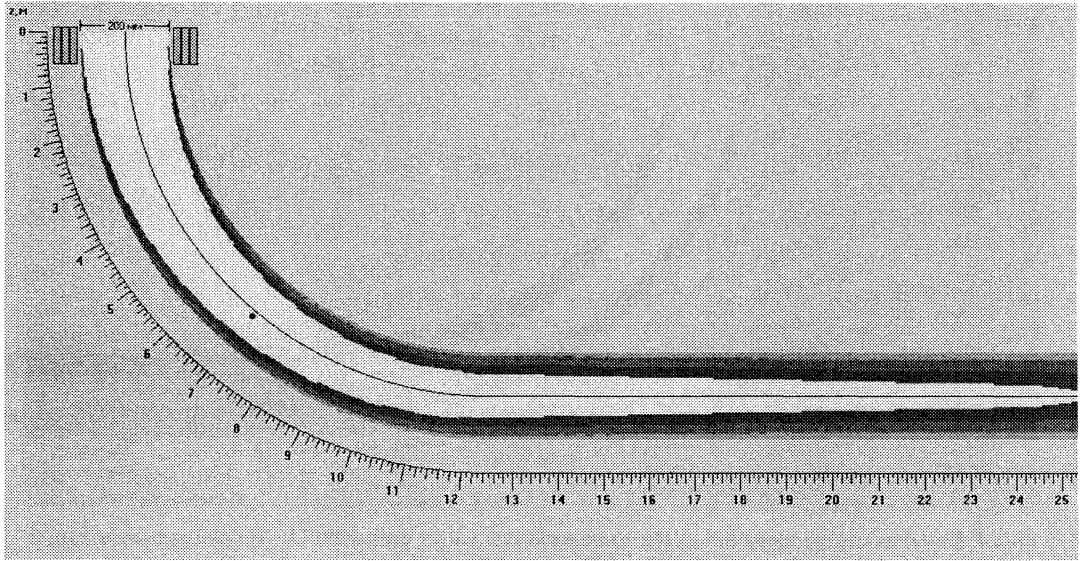


Рис. 7. Распределение температуры по заготовке толщиной 200 мм из стали 60 (III группа охлаждения) при скорости разливки 1 м/мин

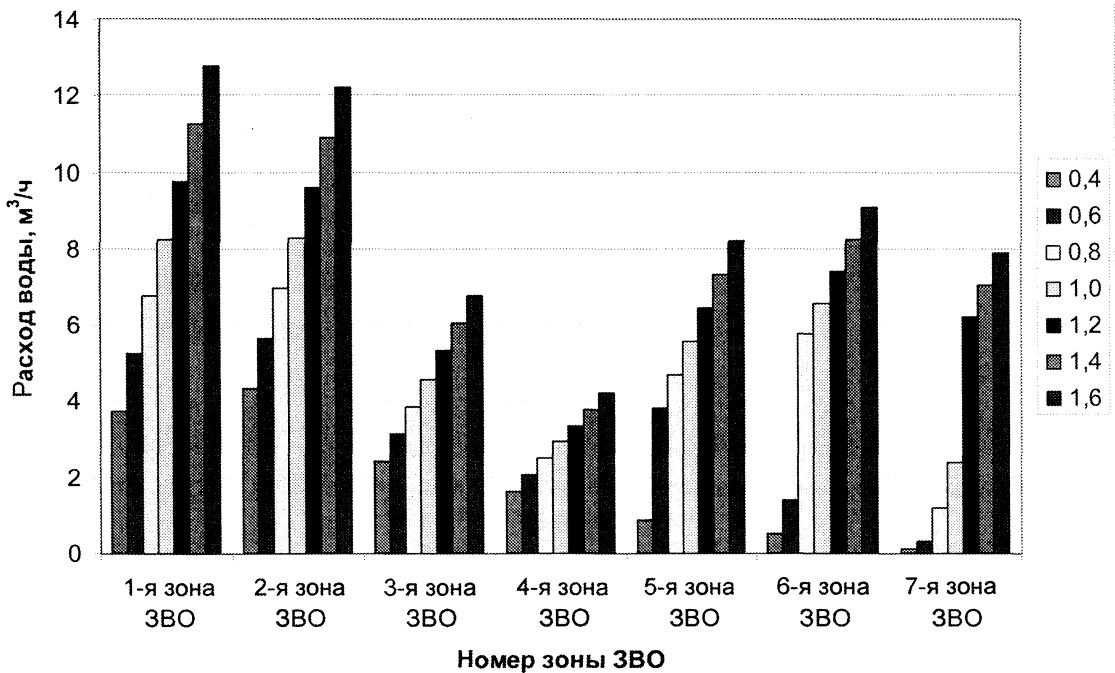


Рис. 8. Расход воды на различных участках ЗВО в зависимости от скорости разливки (м/мин) для сталей I группы охлаждения

Таблица 1. Расход воды в кристаллизаторе и ЗВО (на каждую сторону) при охлаждении сляба толщиной 200 мм I группы охлаждения

Зона охлаждения	Расход воды, м ³ /ч, при скоростях разливки, м/мин						
	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Кристаллизатор	200	280	330	400	460	510	570
1-я зона ЗВО	3,75	5,25	6,75	8,25	9,75	11,25	12,75
2-я зона ЗВО	4,35	5,66	6,97	8,28	9,6	10,91	12,22
3-я зона ЗВО	2,41	3,14	3,86	4,58	5,31	6,03	6,76
4-я зона ЗВО	1,65	2,07	2,5	2,92	3,35	3,77	4,2
5-я зона ЗВО	0,87	3,82	4,68	5,56	6,43	7,31	8,18
6-я зона ЗВО	0,5	1,4	5,75	6,57	7,4	8,22	9,05
7-я зона ЗВО	0,1	0,3	1,2	2,4	6,21	7,03	7,86

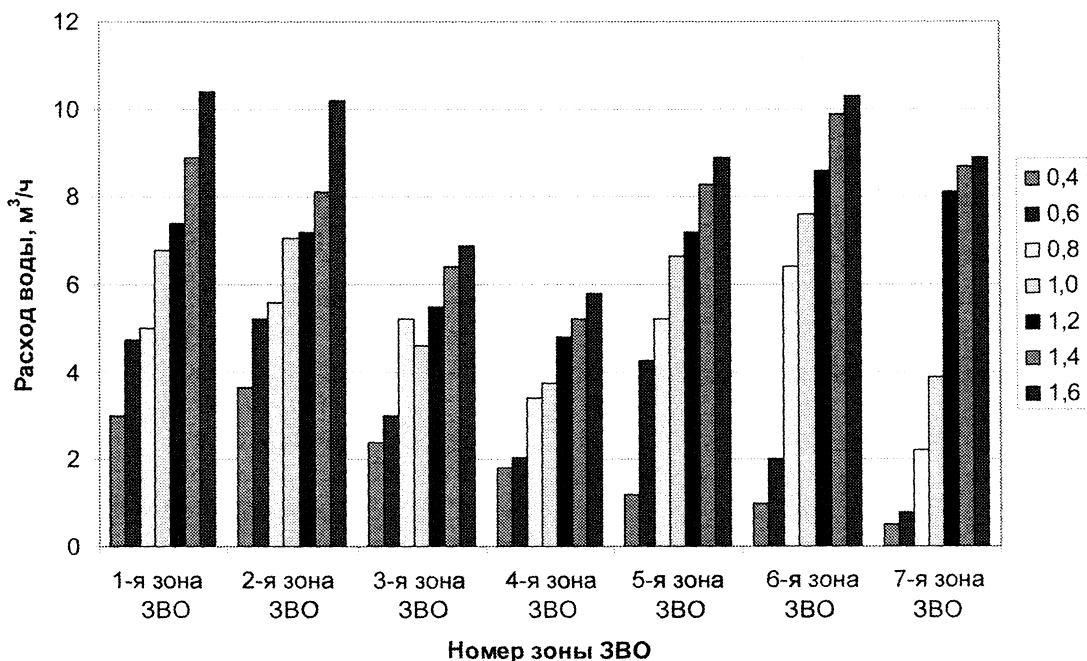


Рис. 10. Расход воды на различных участках ЗВО в зависимости от скорости разливки (м/мин) для сталей III группы охлаждения

Таблица 3. Расход воды в кристаллизаторе и ЗВО (на каждую сторону) при охлаждении сляба толщиной 200 мм III группы охлаждения

Зона охлаждения	Расход воды, м³/ч, при скоростях разливки, м/мин						
	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Кристаллизатор	200	280	330	400	460	510	570
1-я зона ЗВО	3,0	4,75	5,0	6,8	7,4	8,9	10,4
2-я зона ЗВО	3,65	5,2	5,6	7,05	7,2	8,1	10,2
3-я зона ЗВО	2,4	3,0	5,2	4,6	5,5	6,4	6,9
4-я зона ЗВО	1,8	2,05	3,4	3,75	4,8	5,2	5,8
5-я зона ЗВО	1,2	4,25	5,2	6,65	7,2	8,3	8,9
6-я зона ЗВО	1,0	2,0	6,4	7,6	8,6	9,9	10,3
7-я зона ЗВО	0,4	0,7	2,2	3,9	8,2	8,5	8,8

для II группы – 85–90% от длины ЗВО; (5)

для III группы охлаждения – 100 % от длины ЗВО.

Анализ литературных данных, например [3], показал, что скорость разливки стали на МНЛЗ (слябы толщиной 200 и 250 мм) находится в пределах 0,4–1,6 м/мин (средняя – 1 м/мин). В связи с этим в дальнейшем осуществлены расчеты по определению расхода воды в ЗВО в процессе охлаждения непрерывнолитого слитка таким образом, чтобы выполнялось условие (5).

На рис. 2, 3 показаны кинетика затвердевания и распределение температуры по сечению заготовки для стали 08сп при скорости разливки 1 м/мин (I группа охлаждения, температуры ликвидуса и солидуса равны $T_{лик} = 1524 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{сол} = 1481 \text{ }^\circ\text{C}$). Как видно из рис. 3, глубина жидкой лунки составляет 18,2 м или 76% от длины ЗВО. На рис. 4, 5 приведены кинетика затвердевания и распределе-

ние температуры по сечению заготовки для стали 09Г2С при скорости разливки 1 м/мин (II группа охлаждения, температуры ликвидуса и солидуса приняты равными $T_{лик} = 1517 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{сол} = 1468 \text{ }^\circ\text{C}$).

Глубина жидкой лунки (рис. 4) составляет 19,7 м или 84% от длины ЗВО. Результаты расчета кинетики затвердевания и распределения температуры по сечению сляба толщиной 200 мм при охлаждении по режиму для III группы охлаждения (на примере стали 60) показаны на рис. 6, 7. Температуры ликвидуса и солидуса равны соответственно $T_{лик} = 1452 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{сол} = 1420 \text{ }^\circ\text{C}$, температура заливки – 1500 °C. Глубина жидкой лунки (см. рис. 4) составляет 24,5 м или 100% от длины ЗВО и кристаллизатора.

На рис. 8 и в табл. 1 приведены данные по расходу воды по различным участкам ЗВО и кристаллизатора в зависимости от скорости вытягивания слитка. Расходы воды определяли таким образом,

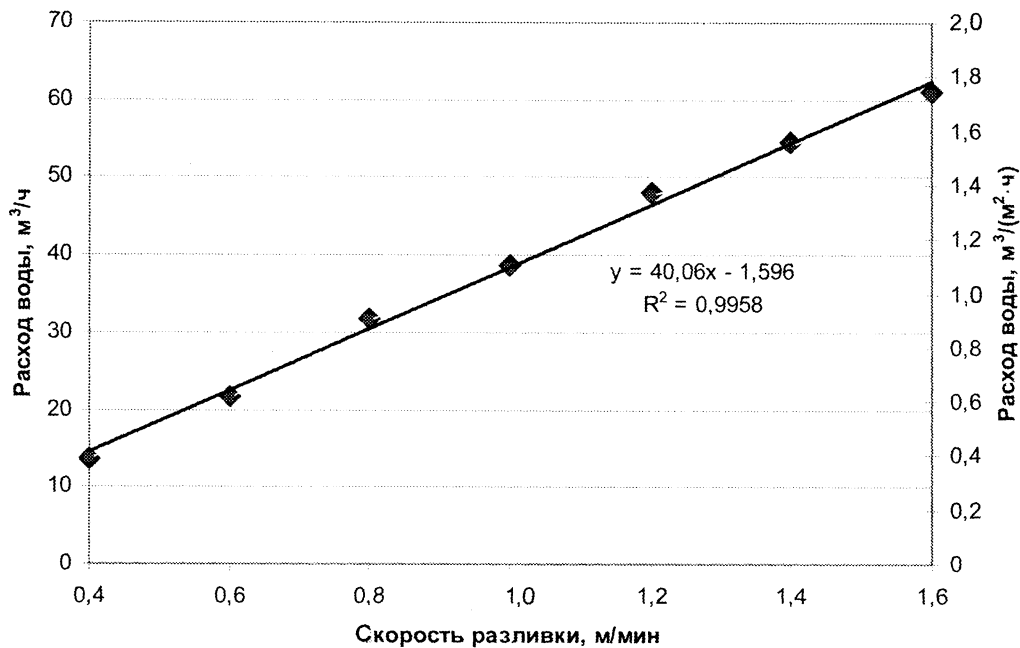


Рис. 11. Влияние скорости вытягивания непрерывнолитого слитка сечением 200 мм на общий и удельный расход воды в ЗВО

чтобы металлургическая длина при этом значительно не изменялась.

Аналогичные исследования были выполнены для II и III групп охлаждения сталей. Результаты приведены в табл. 2, 3 и показаны на рис. 9, 10.

Как видно из рис. 8–10 и табл. 1–3, при разливке сталей II и III групп охлаждения в первых зонах ЗВО уменьшается расход воды, происходит более «мягкое» охлаждение, а в последующих зонах – повышение расхода воды с целью достижения полной кристаллизации слитка в пределах ЗВО. При этом общий расход воды на охлаждение слэбов несколько превышает расход воды для сталей, относящихся к I группе охлаждения. Это объясняется меньшим коэффициентом теплоотдачи в последних зонах ЗВО.

На рис. 11 показана зависимость среднего расхода воды в ЗВО от скорости разливки.

При использовании математической модели затвердевания расплава с начальным перегревом металла [2] проведена серия расчетов по определению динамики кристаллизации и температурного поля непрерывнолитых слэбовых заготовок толщиной 200 мм из сталей, относящихся к различным группам охлаждения. Установлено влияние скорости разливки на условия охлаждения заготовки и приведены рекомендуемые расходы охлаждающей воды в кристаллизаторе и на различных участках зоны вторичного охлаждения для сталей различных групп охлаждения.

Литература

1. Тимошпольский В. И. Развитие металлургического комплекса на базе промышленного освоения железных руд (для использования в Республике Беларусь. В порядке обсуждения) // *Литье и металлургия*. 2007. № 2. С. 6–17.
2. Моделирование затвердевания расплава с начальным перегревом металла / В. И. Тимошпольский, Ю. С. Постольник, И. А. Трусова и др. // *Литье и металлургия*. 2006. № 1. С. 111–115.
3. Гиря А. П., Урбанович Л. И., Ермаков О. Н. Исследование процессов теплообмена в кристаллизаторе МНЛЗ // *Повышение эффективности непрерывной разливки стали: Сб. науч. тр. МЧМ СССР*. М.: Металлургия 1983. С. 4–7.
4. Теплотехнология металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский, Ю. В. Феоктистов, А. Б. Стеблов и др. Мн.: *Навука і тэхніка*, 1992.