

## Влияние интенсивности теплоотвода в зоне вторичного охлаждения на формирование непрерывнолитой заготовки

*Исследовано влияние интенсивности теплоотвода в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ на затвердевание непрерывнолитой заготовки.*

**Ключевые слова:** теплоотвод, непрерывнолитая заготовка, МНЛЗ, зона вторичного охлаждения, двухфазная зона

**Р**авномерное охлаждение непрерывнолитой заготовки является важной задачей, особенно после выхода ее из кристаллизатора, когда твердая корочка имеет небольшую толщину и развитую двухфазную зону.

После кристаллизатора боковая поверхность слитка попадает в зону вторичного охлаждения (ЗВО). Отвод тепла от поверхности заготовки в ЗВО происходит путем интенсивного опрыскивания ее поверхности водой или водовоздушной смесью, отвода тепла к поддерживающим роликам с внутренним охлаждением, а также вследствие конвекции и лучеиспускания в окружающую среду. Для обеспечения равномерного охлаждения заготовки по длине ЗВО предусматривается несколько секций с различной интенсивностью отвода тепла [1].

Интенсивность охлаждения в ЗВО должна выбираться таким образом, чтобы температура поверхности заготовки вдоль технологической линии монотонно уменьшалась или не изменялась [2].

В данной работе в качестве объекта исследования была выбрана непрерывнолитая заготовка из стали марки 09Г2 сечением 300x1840 мм, разливаемая в кристаллизатор высотой 1,1 м со скоростью 0,6 м/мин. Теплофизические характеристики стали 09Г2 представлены в таблице.

Исследование влияния интенсивности теплоотвода с боковой поверхности непрерывнолитой заготовки в зоне вторичного охлаждения на параметры затвердевания проводили методом вычислительного эксперимента. При этом было использовано программное обеспечение, адекватность которого была

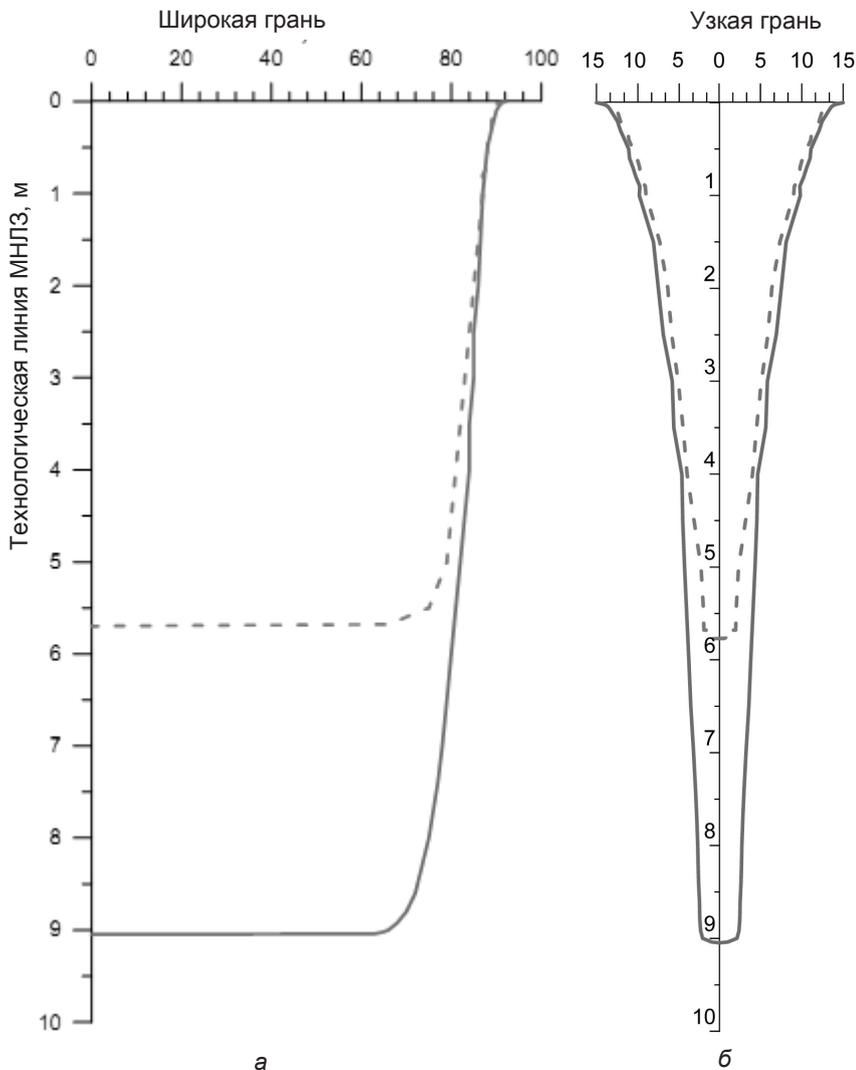
подтверждена путем сопоставления расчетных характеристик с данными термометрирования, полученными на промышленных установках [3, 4].

В качестве режима охлаждения боковой поверхности как в кристаллизаторе, так и в зоне вторичного охлаждения было выбрано изменение интенсивности теплоотвода, соответствующее технологическим условиям получения непрерывнолитой заготовки на МК «Азовсталь» [9]. При проведении вычислительного эксперимента в зоне вторичного охлаждения изменяли интенсивность теплоотвода относительно базового варианта – в два раза меньше и в два раза больше.

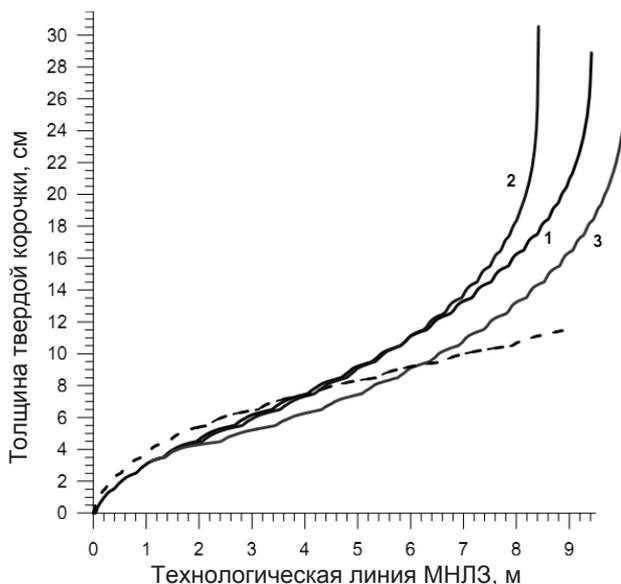
Организация теплоотвода, соответствующая базовому варианту, приводит к тому, что глубина жидкой металлической ванны составляет 5,68 м, а установившаяся твердая корка со 100%-ной твердой фазой наблюдается на глубине 9,04 м (рис. 1). Таким образом, протяженность двухфазной зоны составляет 3,36 м. При выходе из кристаллизатора толщина затвердевшего металла вдоль обеих граней слитка почти одинакова и составляет 3,0-3,3 см. На уровне завершения жидкометаллической ванны толщина твердой корки в центральном сечении по центру широкой грани составляет около 10,5 см, а по центру узкой грани – 27,6 см (рис. 2). Ниже 9,1 м от зеркала металлической ванны температура металла меньше температуры солидус. В центральном сечении по широкой грани (рис. 2, пунктирная кривая) наблюдаем монотонное увеличение затвердевающего металла. По центру узкой грани (рис. 2, кривая 1) наблюдаем большую скорость затвердевания в кристаллизаторе, после выхода из него скорость

### Теплофизические характеристики стали марки 09Г2 в зависимости от температуры [5-8]

$T, ^\circ\text{C}$	600	800	1000	1200	1400	1500	1530
$E, \text{Па}$	$1,8 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$6,3 \cdot 10^{10}$	$2,1 \cdot 10^{10}$	$9,0 \cdot 10^{10}$	$7,0 \cdot 10^{10}$
$\mu$	$8,0 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{-1}$	$3,6 \cdot 10^{-1}$	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$4,3 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-1}$
$\sigma_B, \text{Па}$	$6,7 \cdot 10^7$	$5,3 \cdot 10^7$	$1,43 \cdot 10^7$	$1,41 \cdot 10^7$	$9,3 \cdot 10^6$	$9,0 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^5$
$\sigma_T, \text{Па}$	$5,6 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^7$	$1,06 \cdot 10^7$	$9,0 \cdot 10^6$	$4,08 \cdot 10^6$	$8,0 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$
$\delta$	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-1}$	1,2	$8,3 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$
$\alpha, 1/\text{град}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
$C, \text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$	$5,8 \cdot 10^{-1}$	$6,72 \cdot 10^{-1}$	$6,93 \cdot 10^{-1}$	$6,93 \cdot 10^{-1}$	$7,14 \cdot 10^{-1}$	$8,4 \cdot 10^{-1}$	$8,4 \cdot 10^{-1}$
$\rho, \text{кг/м}^3$	$7,8 \cdot 10^3$	$7,75 \cdot 10^3$	$7,7 \cdot 10^3$	$7,6 \cdot 10^3$	$7,4 \cdot 10^3$	$7,1 \cdot 10^3$	$6,9 \cdot 10^3$
$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$2,7 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$1,61 \cdot 10^3$	$1,79 \cdot 10^3$	$1,68 \cdot 10^3$	$1,54 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$



**Рис. 1.** Положение изотерм солидус (-----) и ликвидус (- . -) по широкой (а) и узкой (б) граням вдоль технологической линии МНЛЗ при затвердевании непрерывной заготовки



**Рис. 2.** Изменение толщины твердой корочки по центру узкой (—) и широкой (----) граней непрерывной заготовки по технологической линии МНЛЗ: 1 – базовый вариант; 2 – интенсивность теплоотвода в ЗВО в 2 раза меньше; 3 – в 2 раза больше относительно базового варианта

затвердевания снижается. После снятия перегрева (на уровне 6,5-7,0 м по технологической линии МНЛЗ), когда затвердевание отливки происходит в двухфазном состоянии, скорость затвердевания резко возрастает.

Кривые, представленные на рис. 3 позволяют оценить изменение температуры поверхности по центру узкой и широкой граней. Находясь в кристаллизаторе по центру узкой грани, она опускается с 1540 °С (температуры заливки) до 950 °С, а по центру широкой грани – до 730 °С (рис. 3, кривая 1). После выхода заготовки из водоохлаждаемого кристаллизатора интенсивность теплоотвода падает, что приводит к повышению температуры в пристеночной области по центру узкой грани на расстоянии 1 м от кристаллизатора до 1080 °С и, соответственно, по центру узкой и широкой граням – до 970 °С. Тепло, которое поступает от перегретого ядра, не может быть полностью отведено теплоносителями зоны вторичного охлаждения. Этот факт обуславливает локальное повышение температуры в этой области.

Необходимо отметить, что существенных изменений в скоростях охлаждения у фронта затвердевания не наблюдается. Стабилизация процесса охлаждения и монотонное снижение температуры поверхности имеют место на расстоянии 2 м от мениска. В дальнейшем, по

технологической линии МНЛЗ наблюдаем монотонное снижение температуры наружной поверхности заготовки. По мере удаления от мениска разница температур по центру широкой и узкой граней сокращается и на расстоянии 9 м не превышает 40 °С.

Снижение интенсивности теплоотвода в ЗВО в два раза относительно базового варианта приводит к увеличению глубины жидкого металла до 5,8 м, а затвердевший металл устанавливается на расстоянии 10,2 м. Таким образом, протяженность двухфазной зоны увеличилась до 4,4 м. Толщина твердой корочки по центру широкой грани до 7 м по технологической линии МНЛЗ практически совпадает с базовым вариантом (рис. 2, кривая 2). В дальнейшем скорость затвердевания увеличивается.

После выхода из кристаллизатора температура поверхности по центру узкой и широкой граней не меняется относительно базового варианта (рис. 3, кривая 2). В ЗВО наблюдаем повышение до 1180 и 960 °С соответственно. Такой значительный разогрев может привести к снижению прочностных показателей затвердевшего металла. Высокая температура сохраняется на расстоянии более 1,1 м

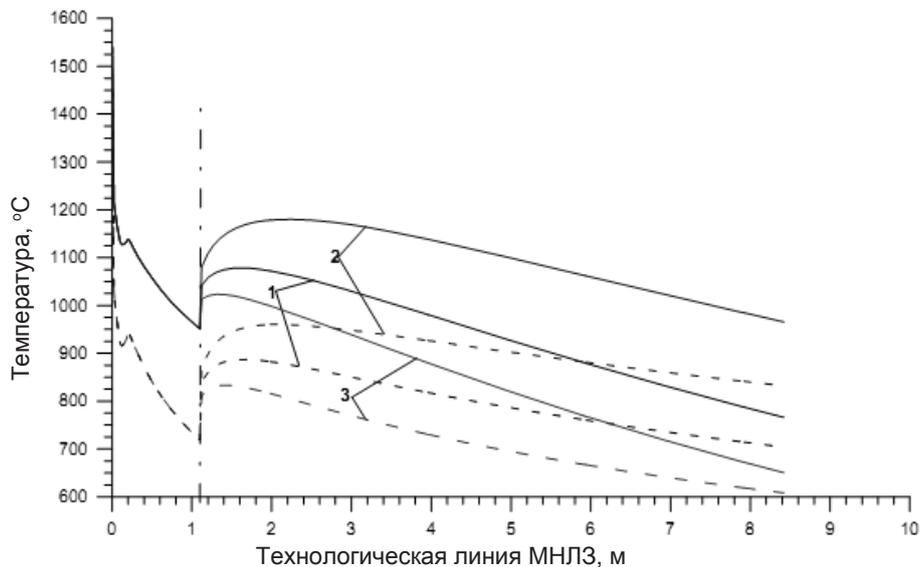


Рис. 3. Изменение температуры поверхности по центру узкой (-----) и широкой (—) граней непрерывнолитой заготовки: 1 – базовый вариант; 2 – интенсивность теплоотвода в ЗВО в 2 раза меньше; 3 – в 2 раза больше относительно базового варианта.

от кристаллизатора. Таким образом, видно, что рассмотренный режим охлаждения ухудшает условия формирования заготовки.

Увеличение интенсивности теплоотвода в ЗВО приводит к незначительному уменьшению глубины жидкой металлической ванны по сравнению с базовым вариантом (3,03 м), а твердый металл наблюдаем на глубине ниже 8,5 м от зеркала металла.

После выхода из кристаллизатора по центру узкой и широкой граней (рис. 3, кривая 3) замечаем повышение температуры на протяжении 0,5-0,8 м под кристаллизатором, и они достигают значений 1025 и 833 °С соответственно.

Проведенный анализ показал, что вариация интенсивности режима охлаждения в ЗВО является действенным параметром, с помощью которого можно существенно влиять на теплофизические параметры формирования непрерывнолитой заготовки.

На основании изменения температуры поверхности ( $T_{пов.}$ ) вдоль линии вытягивания и соответствующей толщины корки можно провести оценку изменения допустимого предела прочности ( $\sigma_{кр.}$ ) и деформации ( $\varepsilon_{кр.}$ ), которые исключают нежелательные изменения напряженно-деформационного состояния слитка [5]:

$$\sigma_{кр.} = \sigma_m \cdot \exp \left( \beta \cdot \left( 1 - \frac{T_{пл.}}{T_{пов.}} \right) \right)$$

$$\varepsilon_{кр.} \approx 2,0 \cdot \tau^{-0,55}$$

где  $\sigma_m$  – напряжение вблизи температуры солидуса стали, равное по экспериментальным данным 7,5-8,0 МПа;  $T_{пл.}$  – температура плавления стали;  $\beta$  – экспериментальный коэффициент, равный 6,88;  $\tau$  – продолжительность затвердевания корочки непрерывнолитой заготовки.

Максимальные значения допустимых характеристик (рис. 4) имеем на расстоянии 0,5-1,0 м от кристаллизатора. Далее, по технологической линии

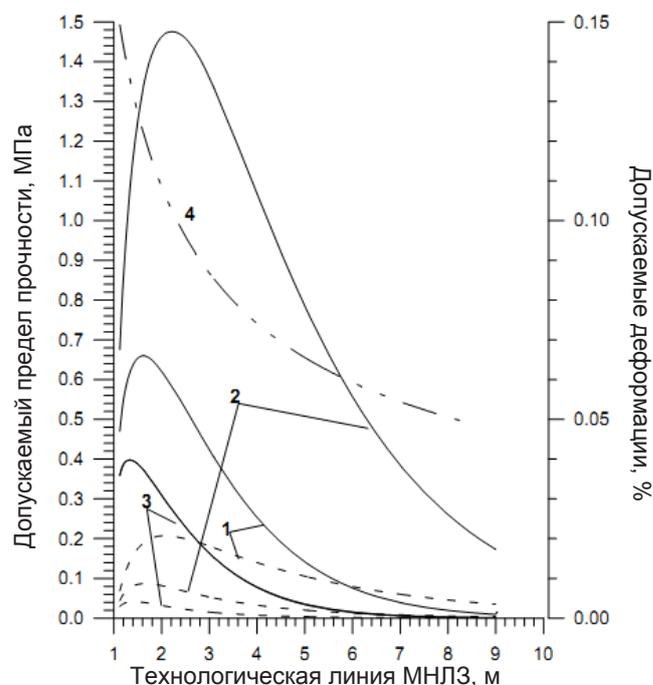
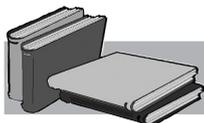


Рис. 4. Изменение допускаемого предела прочности (1-3) и деформации (4) по центру узкой (—) и широкой (- - -) граней непрерывнолитой заготовки по технологической линии МНЛЗ после выхода ее из кристаллизатора. 1 – базовый вариант; 2 – интенсивность теплоотвода в ЗВО в 2 раза меньше; 3 – в 2 раза больше относительно базового варианта

МНЛЗ значения допустимого предела прочности резко снижаются, а ниже 8,0 м наблюдаем относительную стабилизацию этих характеристик. С увеличением интенсивности теплоотвода в ЗВО понижаются значения допустимого предела прочности на соответствующих уровнях МНЛЗ.

Исходя из вышеизложенного напрашивается вывод о том, что изменяя интенсивность теплоотвода можно эффективно управлять как тепловым состоянием затвердевшей корки, так и ее прочностными характеристиками.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Процессы непрерывной разливки / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев, С. В. Момот, Ю. Н. Белобров. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
2. *Самойлович Ю. А., Крулевецкий С. А., Горяинов В. А.* Тепловые процессы при непрерывном литье – М.: Metallurgy, 1982. – 152 с.
3. Новая конструкция телескопа радиационного пирометра / О. В. Носоченко, В. В. Емельянов, В. И. Лебедев и др. // Черная металлургия. – № 146 (992). – 1982. – С. 57-58.
4. *Тарасевич Н. И., Корниец И. В., Тарасевич И. Н.* Выбор оптимальных условий теплоотвода с боковой поверхности непрерывнолитой заготовки в зоне вторичного охлаждения // Металл и литье Украины. – № 10. – 2014. – С. 8-11.
5. *Ефимов В. А.* Разливка и кристаллизация стали. – М.: Metallurgy. – 1976. – 552 с.
6. *Гуляев А.П.* Металловедение. – М.: Metallurgy, 1977. – 623 с.
7. Влияние контролируемой прокатки на механические свойства, структуру и характер разрушения стали 09Г2 / Ю. И. Матросов, В. Н. Филимонов и др. // Изв. АН СССР. Металлы. – 1980. – № 5. – С. 99-106.
8. *Журавлев В. А., Китаев Е. М.* Теплофизика формирования непрерывного слитка. – М.: Metallurgy, 1974. – 216 с.
9. *Емельянов В. В.* Разработка технологии охлаждения непрерывнолитых слябов / Дис. работа на соискание уч.ст. к.т.н. – Киев. – 1985. – 287 с.

### Анотація

*Корнієць І. В., Тарасевич М. І., Тарасевич І. М., Кошовий І. К., Рибіцький О. І.*  
Вплив інтенсивності тепловідводу в зоні вторинного охолодження МБЛЗ на тверднення безперервнолитої заготовки

*Досліджено вплив інтенсивності тепловідводу в зоні вторинного охолодження МБЛЗ на тверднення безперервнолитої заготовки.*

### Ключові слова

*теповідвод, безперервнолита заготовка, МБЛЗ, зона вторинного охолодження, двофазна зона*

### Summary

*Korniets I., Tarasevich N., Tarasevich I., Koshevoy I., Rybitskiy A.*  
Influence of heat transfer intensity in secondary cooling zone on continuous cast ingot forming

*The influence of heat transfer intensity in secondary cooling zone of continuous caster on continuous cast ingot solidification was investigated.*

### Keywords

*heat transfer, continuous cast ingot, continuous caster, secondary cooling zone, two-phase zone*

Поступила 27.11.2014