

УДК 621.74.047

**Н. В. НАЗАРЕНКО\***, **Е. А. ЧИЧКАРЕВ\*\*** (канд. техн. наук, доц.)

\* - Мариупольский государственный гуманитарный университет,

\*\* - Приазовский государственный технический университет

## **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПЕРИТЕКТИЧЕСКИХ МАРОК СТАЛИ ЗА СЧЁТ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАЗЛИВКИ**

Представлены результаты анализа особенностей технологии непрерывной разливки стали в слябовые заготовки. Предложены расчётные формулы для оценки рациональной скорости вытягивания заготовки и конусности кристаллизатора. Проанализирована зависимость объёма зачистки поверхностных дефектов слябовых заготовок от химического состава стали.

**непрерывная разливка стали, качество, продольные трещины, скорость разливки**

Одним из наиболее важных узлов, определяющих рациональную работу машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и оптимальное качество непрерывнолитой заготовки, является кристаллизатор, в котором за счет отвода тепла от расплава охлаждающей водой (от 10 % до 30 % всего тепла) происходит формообразование заготовки [1].

Определение закономерностей теплообмена между заготовкой и кристаллизатором является актуальной задачей, поскольку от условий теплообмена зависит производительность МНЛЗ и качество поверхностных и подповерхностных слоев заготовки. Знание закономерностей теплообмена между заготовкой и кристаллизатором позволяет оптимизировать конструкцию кристаллизатора для каждого конкретного случая [2].

Однозначного решения вопроса о степени влияния различных факторов на качество поверхности и макроструктуры слитков по отдельным видам дефектов в литературных источниках нет. Для решения проблемы оптимизации технологических процессов в настоящее время широко используются как эмпирические подходы, основанные на обобщении производственного опыта, так и совершенствование технологии на базе использования математических моделей, описывающих технологические процессы с учетом большого числа технологических и конструктивных факторов.

Достаточно сложной технологической задачей является непрерывная разливка в слябовые заготовки перитектических марок стали, склонных к образованию продольных трещин. При всей современной значимости непрерывной разливки стали вопросы обеспечения качества литой заготовки и ее поверхности в ряде случаев остаются проблемными, особенно при производстве проката ответственного назначения.

Продольные трещины (longitudinal cracks) – поверхностный дефект, характерный в основном для перитектических сталей, содержащих около 0,1 % С.

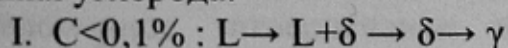
Этот дефект обычно представляет собой несколько изогнутую (волнистую) трещину, которая может измениться по длине от нескольких сантиметров вплоть до нескольких метров в отдельных случаях. Продольные трещины обычно формируются в центральной части кристаллизатора как по большому, так и по малому радиусу. Дефект обычно появляется в начале разливки плавки. Слябы из низкоуглеродистых (<0,08 %) и марганецсодержащих (> 1,1 %) марок стали иногда поражаются относительно короткими продольными трещинами (длиной около 100 мм).

Продольные трещины трудно выявляются на слябах непосредственно после разливки и часто ассоциируются с мелкими неоднородностями, расположенными возле поверхности сляба.

По данным французских исследователей, как начало разливки плавки, так и смена сталеразливочного и промежуточного ковша ведет к формированию трещин. Кроме того, при непрерывной разливке перитектических сталей отмечается зависимость пораженности продольными трещинами от вариаций скорости вытягивания заготовки [3].

По мнению японских исследователей [4], основной причиной формирования продольных трещин на непрерывнолитых слябах из перитектических сталей являются объёмные изменения за счёт  $\delta$ – $\gamma$ -превращения при перитектической температуре. Условия предотвращения формирования трещин следующие: стабилизация проникновения шлака в зазор между кристаллизатором и заготовкой, контроль установки погружного стакана, уменьшение времени установления стационарной скорости разливки.

Химический состав стали (даже внутри марочного) оказывает существенное влияние на вероятность возникновения продольных трещин. Наиболее опасным является интервал концентраций углерода 0,10-0,14 %. Иллюстрация к механизму формирования продольных трещин представлена на рис.1 (см. график и схему, характеризующую типы затвердевания для сталей с различным содержанием углерода). Типы затвердевания непрерывнолитых заготовок из различных марок стали в зависимости от содержания углерода:



- II.  $0,1 < C < 0,18\%$ :  $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow \delta + \gamma \rightarrow \gamma$  – перитектические стали
- III.  $C = 0,18\%$ :  $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow \gamma$
- IV.  $0,18 < C < 0,52\%$ :  $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma$
- V.  $C > 0,52\%$ :  $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma$

Кроме того, к росту пораженности непрерывнолитых заготовок трещинами ведёт увеличение содержания серы в стали, т.к. формирование включений сульфида марганца в междендритных пространствах зависит от соотношения  $[Mn]/[S]$  (характерный пример - иллюстрация формирования пленочных включений сульфида марганца в междендритных пространствах - представлен на рис. II).

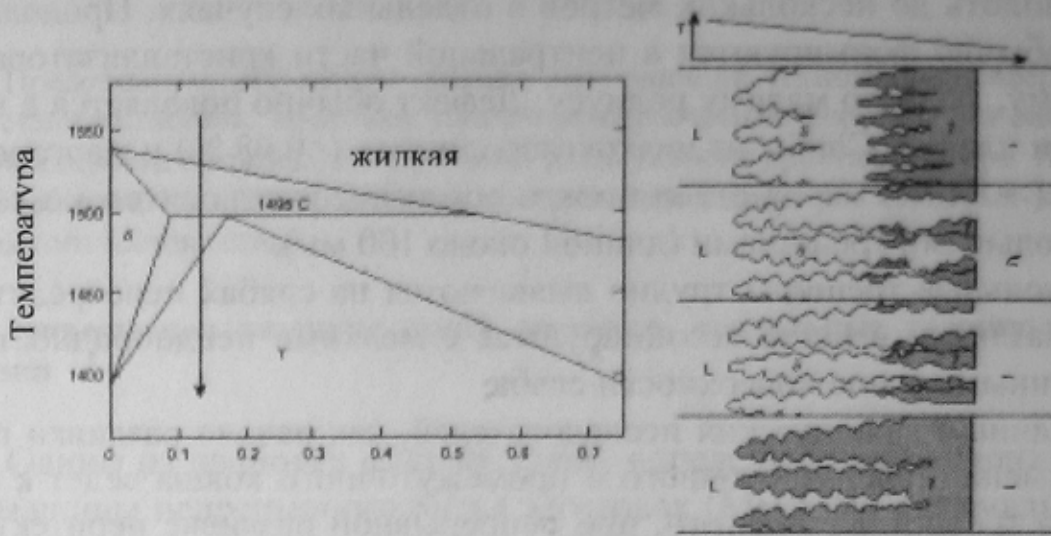


Рисунок 1 – Формирование первичной структуры затвердевания для перитектических сталей.

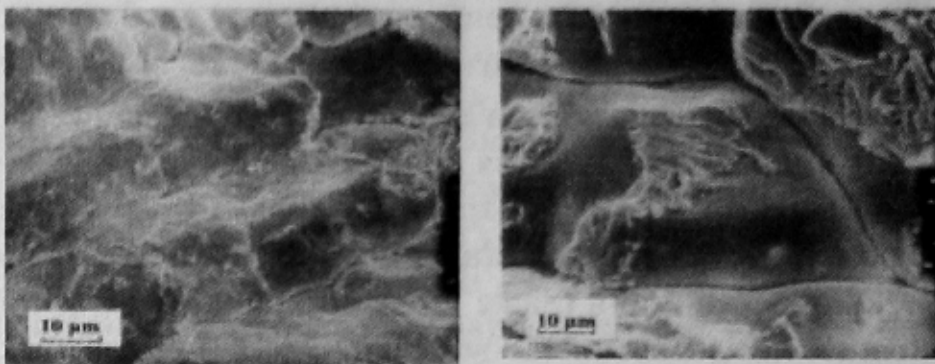


Рисунок 2 – Сульфиды в междендритных пространствах (сталь, микролегированная ниобием : 0,15 % C, 0,014 % S, 0,049 % Nb; данные [5])

Основной характеристикой склонности сталей различного химического состава к формированию продольных трещин является ферритный потенциал [6]:

$$F_p = 2.5 (0.5 - [C_{eq}]), \quad (1)$$

где

$$C_{eq} = [\%C] + 0,04[\%Mn] + 0,1[\%Ni] + 0,7[\%N] - 0,14[\%Si] - 0,04[\%Cr] - 0,1[\%Mo] - 0,24[\%Ti] - 0,7[\%S]. \quad (2)$$

Величина  $F_p > 1$  соответствует формированию полностью ферритной структуры в области солидуса (для чистого  $\delta$ -железа  $F_p = 1,25$ ). При  $F_p < 0$  формируется полностью аустенитная структура.

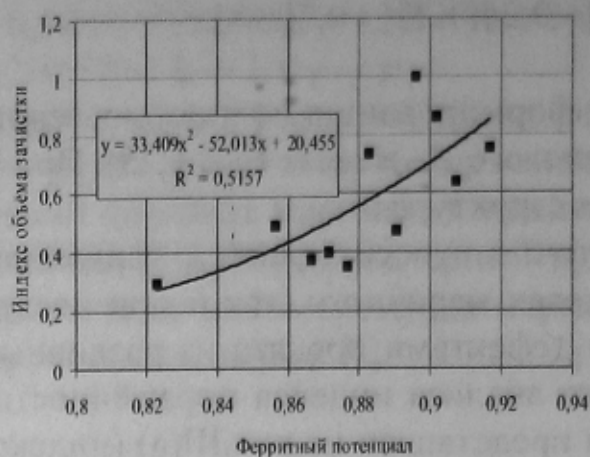
Данная характеристика достаточно чувствительна к вариациям химического состава стали как в пределах марочного, так и при исследовании поражённости поверхностными дефектами проката из различных марок стали. Результат статистического анализа индекса поражённости слябов из перитектических марок стали представлен на рис. III(a) (индекс оценивался по относительному объёму зачистки поверхности слябовых заготовок).

Как показало сопоставление объёма зачистки различных слябов из различных марок стали (перитектических и близких к ним по химическому составу), варьирование массовых долей марганца и кремния в пределах марочного состава позволяет заметно (на 20-30 %) снизить объём зачистки поверхности слябовых заготовок (см. рис. III(a)). Например, снижение содержания углерода с 0,13-0,14 % до 0,11-0,12 % ведёт к увеличению объёма зачистки в 1,5 раза. Для стали с массовой долей углерода 0,14-0,16 % оптимальная (по величине ферритного потенциала) массовая доля 1,35-1,50 %. Снижение массовой доли марганца до 1,23-1,35 % (при той же массовой доле углерода) заметно отражается на объёме зачистки (при отклонении химического состава металла от оптимального объём зачистки растёт).

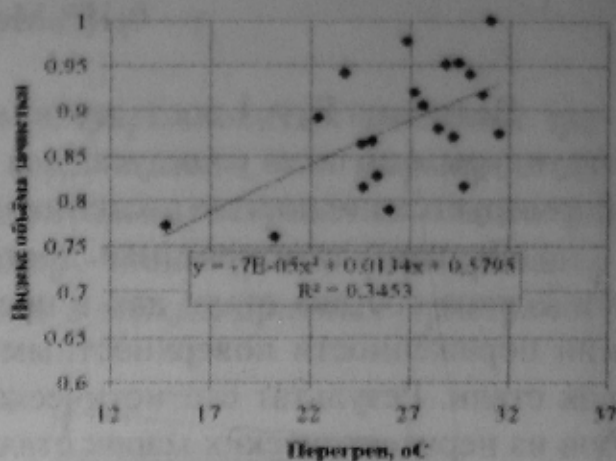
Однако возможности варьирования химического состава металла весьма ограничены, поэтому для снижения поражённости слябов из перитектических марок стали используют управление конусностью и условиями теплообмена в кристаллизаторе МНЛЗ.

Анализ технологии непрерывной разливки на криволинейной слябовой МНЛЗ (разливка в слябы сечением от 220x1250 до 300x1850 мм) для группы перитектических марок стали показал, что дополнительным фактором, определяющим вероятность формирования продольных трещин, является перегрев металла в промежуточном ковше (см. рис. III(б)). Таким образом, наряду с выполнением требований по регулированию химического состава стали в узких пределах, целесообразно снизить перегрев в промежуточном ковше МНЛЗ. Кроме того, важным условием снижения поражённости слябов из перитектических марок стали является равномерное затвердевание корочки (правильная геометрия гильзы,

симметричный подвод металла: соосная установка погружных стаканов и отсутствие наростов в их каналах).



а)



б)

Рисунок 3 – Влияние ферритного потенциала (а) и перегрева (б) на объём зачистки поверхности непрерывнолитых слябовых заготовок (перитектические марки стали, 1 точка – среднее по 100 плавкам)

Однако изменение перегрева металла влечёт за собой и изменение допустимой скорости разливки. Это особенно существенно для перитектических марок стали вследствие сильной зависимости теплового потока в кристаллизаторе от массовой доли углерода с резким снижением его для перитектических сталей [4].

На основании уравнений теплового и материального баланса кристаллизатора получено уравнение для оценки рациональной скорости вытягивания (с учётом предположения о практически полном снятии перегрева в кристаллизаторе):

$$w = \bar{q} \cdot \frac{2h_a}{\rho(Rc\Delta T + 2xL)} \cdot \left(1 + \frac{R}{b}\right), \quad (3)$$

где  $\bar{q}$  – средний тепловой поток, отводимый от поверхности сляба в кристаллизаторе;  $h_a$  – высота кристаллизатора;  $b$ ,  $R$  – ширина и толщина сляба;  $c$  – теплоёмкость металла;  $x$  – толщина твёрдой корки;  $L$  – теплота кристаллизации.

Для расчёта  $\bar{q}$  использовалась несколько видоизменённая зависимость Е.М. Китаева [7], в которой коэффициент А оценивался по результатам контроля количества теплоты, отводимого в кристаллизаторе:

$$\bar{q} = A \cdot \left(\frac{R}{2}\right)^{0,11} \cdot \left(\frac{2\mu}{1+\mu}\right)^{-0,75} \cdot \mu^{0,3} \cdot \left(\frac{h_a}{w}\right)^{0,43}, \quad (4)$$

где  $\mu$  - соотношение сторон поперечного сечения непрерывнолитой заготовки.

Как показал статистический анализ зависимости объёма зачистки поверхности слябов из перитектических марок стали, оценка оптимальной скорости соответствует результатам расчёта по уравнению (3). За счёт подбора рационального температурно-скоростного режима непрерывной разливки перитектических марок стали снижение объёма зачистки составило 10-15 %.

Важным фактором, влияющим на объём зачистки слябов является конусность кристаллизатора. Установлено (см. [3]), что индекс поражённости слябов продольными трещинами ниже при использовании параболического кристаллизатора или кристаллизатора с конусностью 1,2-1,3 % по сравнению с кристаллизатором с конусностью 1,1%.

Оптимальная конусность должна обеспечивать на выходе из кристаллизатора сечение, соответствующее ширине затвердевшей корки стали по широкой грани сляба. Принимая затвердевшую корку стали за единичный элемент, температура которого определяется как среднее значение между температурой ликвидус и температурой на поверхности корки, можно рассчитать оптимальную конусность кристаллизатора:

$$w = \frac{l_{в.к.}}{h_{кр}} \left[ 1 - \frac{1}{1 + k \sqrt{\frac{h_p}{v}} \cdot \left( \frac{\rho_{ж}}{\rho_{тв}} - 1 \right)} \right] \cdot 100, \quad (5)$$

где  $w$  – конусность узких стенок кристаллизатора, %;  $l_{в.к.}$  – ширина верхнего сечения кристаллизатора, м;  $h_p$ ,  $h_{кр}$  – высота расчёта и высота кристаллизатора соответственно, м;  $\rho_{ж}$ ,  $\rho_{тв}$  – плотность жидкой и твердой стали соответственно, м<sup>3</sup>/кг;  $v$  – скорость разливки, м/мин;  $k$  – коэффициент, учитывающий кинетику затвердевания корки стали (0,2-0,25), мин<sup>-0,5</sup>.

Как показал статистический анализ промышленных плавов, за счёт подбора рациональной конусности кристаллизатора в зависимости от коэффициента затвердевания и ширины сляба, снижение объёма зачистки достигает также 10-15 %.

Таким образом, на основании результатов аналитического моделирования и статистического анализа результатов промышленных плавов установлены рациональные параметры разливки перитектических марок стали в слябовые заготовки. Предложенные расчётные формулы для оценки

раціональної швидкості витягивання и конусности кристаллизатора соответствують результатам промисленого опробования.

### Список литературы

1. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. - М.: Металлургия, 1988. 143 с.
2. Никитенко Н.И., Соколов Л.А. К исследованию кристаллизации непрерывного слитка прямоугольного сечения // Изв. АН СССР. Металлы, 1969. № 3. С. 72—79.
3. Control of Surface Quality of 0,08%<C<0,12% Steel Slabs in Continuous Casting / Vincent Guyot, J.-F. Martin, A. Ruelle e.a // ISIJ International, Vol. 36. - 1996.- Supplement, P. S227-S230.
4. Improvement of the Initial Stage of Solidification by Using Mild Cooling Mold Powder / Masayuki KAWAMOTO Yuichi TSUKAGUCHI, Norihiro NISHIDA e.a. // ISIJ International, Vol. 37. - 1997, № 2,- P. 134-139.
5. Mišičko R., Masek V., Sojko M. PRASKANIE PLYNULE ODLIEVANÝCH POLOTOVAROV Z PERITEKTICKÝCH OCELÍ // Acta Metallurgica Slovaca. - V.12. - 2006, № 2. - P. 219 - 225.
6. Mazumdar S., Ray S.K. Solidification control in continuous casting of steel // *Sadhana*, Vol. 26, Parts 1 & 2, February–April 2001, P. 179–198.
7. Журавлев В.А, Китаев Е.М. Теплофизика формирования непрерывного слитка / В.А. Журавлев, Е.М. Китаев.- М.:Металлургия, 1974.- 216 с.

Надійшла до редколегії 23.09.2009.

**Н. В. НАЗАРЕНКО, Е. А. ЧИЧКАРЕВ**

\* - Маріупільський державний гуманітарний університет,

\*\* - Приазовський державний технічний університет

**Підвищення якості безперервнолитих заготовок з перитектичних марок сталі за рахунок вибору раціональних параметрів розливання.** Представлені результати аналізу особливостей технології безперервного розливання сталі в слябові заготовки.

*безперервне розливання, якість, продольні тріщини, швидкість розливання*

**N. V. NAZARENKO, E. A. CHICHKAREV**

\* - Mariupolsky State Humanities University,

\*\* - Priazovsky State Technical University

**Increasing the Slab Quality by Means of Choosing Efficient Casting Parameters.**

The article presents the results of the analysis of continuous slab casting technology and provides calculation formulas to estimate rational casting speed and mould cone parameters

*continuous casting, quality, cracks, casting speed*

© Н. В. Назаренко,  
Е. А. Чичкарев, 2009