



УДК 621.746.47: 621.74.047:669.18

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ОХЛАЖДЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО СЛИТКА НА ОБРАЗОВАНИЕ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН

С.В. Порядин, В.И. Дождиков, О.А. Коваленко

Липецкий государственный технический университет,  
ул. Московская, 30, Липецк, 398600, Россия, e-mail: [porjadscorpio@mail.ru](mailto:porjadscorpio@mail.ru)

**Аннотация.** В работе предлагается методика исследования влияния режима охлаждения непрерывного слитка на образование горячих трещин, основанная на определении предельной скорости деформации, которая связана с давлением кавитации и скоростью кристаллизации металла. Обосновывается необходимость совместного рассмотрения решения задачи определения влияния режима охлаждения металла на его пластические свойства и результатов вычисления значений предельной скорости деформации при этих условиях.

**Ключевые слова:** непрерывная разливка стали, кристаллизация, оптимизация, дефекты слитка.

**1. Введение.** Одним из видов дефектов непрерывного слитка являются горячие трещины, которые зарождаются на фронте кристаллизации. На процесс их формирования оказывают влияние такие факторы, как ферростатическое давление столба жидкой стали, давление кавитации, создаваемое растворенными в расплаве газами, и расстояние между ветвями дендритов второго порядка.

В работе [1] предложена формула для расчета предельно допустимой скорости деформации в зависимости от перечисленных факторов. Кроме того, в ней учитывается скорость роста твердой корочки и вязкость жидкой стали, и особое влияние оказывает соотношение жидкой и твердой фазы в двухфазном состоянии в зависимости от температуры. Таким образом, условием отсутствия развития горячих трещин является выражение [1]:

$$\dot{\epsilon} \geq \frac{1}{R} \left[ \frac{\lambda_2^2 \|\nabla T\|}{180\mu_1} \frac{\rho_L}{\rho_S} (p_m - p_c) - \nu_T \frac{(\rho_S - \rho_L)}{\rho_S} H \right], \quad (1)$$

где  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации слитка,  $\lambda_2$  – расстояние между вторичными ветвями дендритов,  $\|\nabla T\|$  – среднее значение градиента температур в двухфазной зоне,  $\mu_1$  – коэффициент динамической вязкости стали,  $\rho_L$ ,  $\rho_S$  – плотность стали в жидком и твердом состоянии соответственно,  $p_m$  – сумма атмосферного и ферростатического давлений,  $p_c$  – давление кавитации газов растворенных в стали,  $\nu_T$  – скорость движения фронта кристаллизации;

$$R = \int_{T_L}^{T_S} \frac{g_S^2 F(T)}{g_L^3} dT, \quad \text{где} \quad F(T) = \frac{1}{\|\nabla T\|} \int_{T_S}^{T_L} g_S dT, \quad (2)$$



$$H = \int_{T_S}^{T_L} \frac{g_S^2}{g_L^2} dT; \tag{3}$$

где  $T_L, T_S$  – температуры ликвидуса и солидуса соответственно,  $g_L, g_S$  – доля жидкой и твердой фазы соответственно.

Давление кавитации принимается равным давлению газов, скапливающихся в междендритном пространстве. Его можно найти по формуле Сиверта [2, 3]:

$$p_c = \left( \frac{V_r}{K} \right)^2, \tag{4}$$

где  $V_r$  – содержание газа, растворенного в расплаве [3],  $K$  – константа, зависящая от температуры и состава сплава. Для стали с содержанием 0,1 масс. % углерода эта константа находится по формуле [3]:

$$K = 88 \cdot 10^{-8} \cdot T - 37,2 \cdot 10^{-5}. \tag{5}$$

Уравнение для нахождения расстояния между ветвями дендритов второго порядка, согласно [4] имеет вид:

$$\lambda_2 = 64,8 \cdot C_R^{-0,36} \cdot \exp(2,12 \cdot C), \tag{6}$$

где  $C_R$  – скорость охлаждения,  $K/s$ ;  $c$  – содержание углерода в стали, масс. %.

Среднее значение градиента температур в двухфазной зоне, скорость движения фронта кристаллизации определяли с помощью математической модели охлаждения и затвердевания непрерывнолитого слитка, построенной в рамках теории квазиравновесной двухфазной зоны [5, 6, 7, 10].

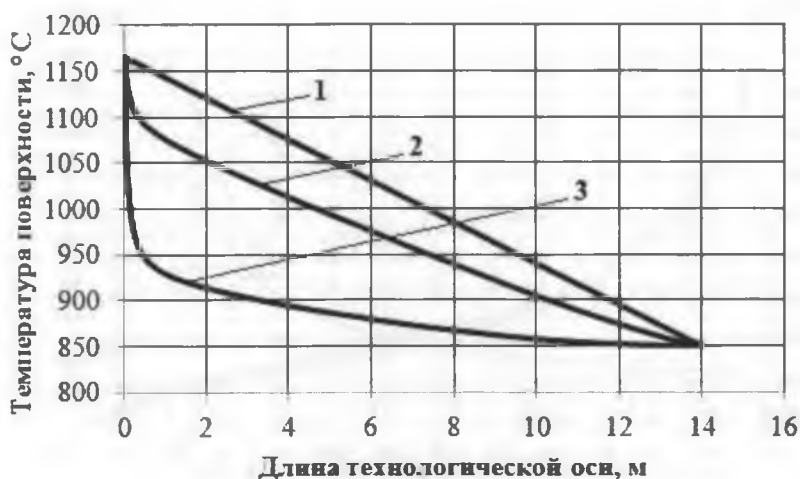


Рис. 1. Режимы охлаждения непрерывного слитка:

1 – мягкий режим, 2 – режим средней интенсивности охлаждения, 3 – жесткий режим.



**2. Эксперимент.** На основе описанной методики был проведен вычислительный эксперимент для непрерывного слитка с содержанием 0,1 масс.% углерода толщиной 250 мм. Температура разливки составляла 1532°C, скорость разливки – 1 м/мин. Длина кристаллизатора – 0,8 м, длина зоны вторичного охлаждения – 14,2 м. Условия охлаждения слитка в кристаллизаторе полагали неизменным. Режимы охлаждения в ЗВО заданы тремя способами распределения температуры на поверхности слитка (рис. 1).

Изменение значения расстояния между ветвями дендритов второго порядка, согласно выбранным режимам охлаждения, представлено на рис. 2. Из рисунка видно, что большие значения междендритного расстояния соответствуют более мягкому режиму охлаждения.

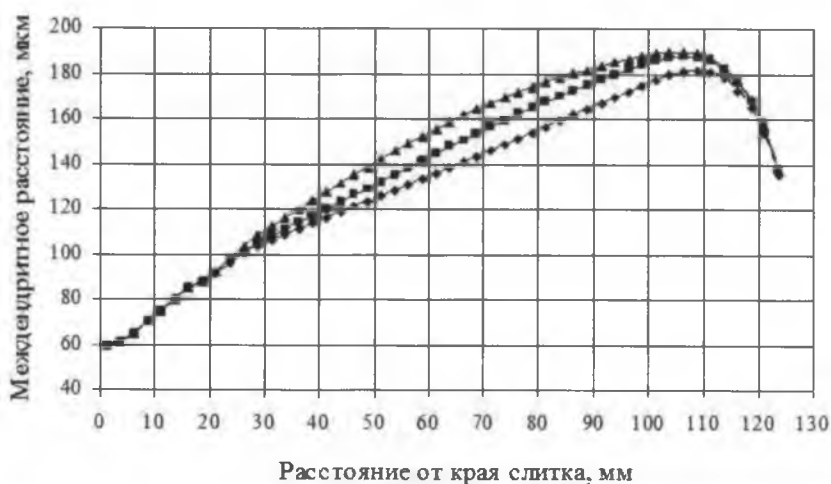


Рис. 2. Расстояние между ветвями дендритов второго порядка:

▲ – мягкий режим, ■ – режим средней интенсивности охлаждения, ◆ – жесткий режим.

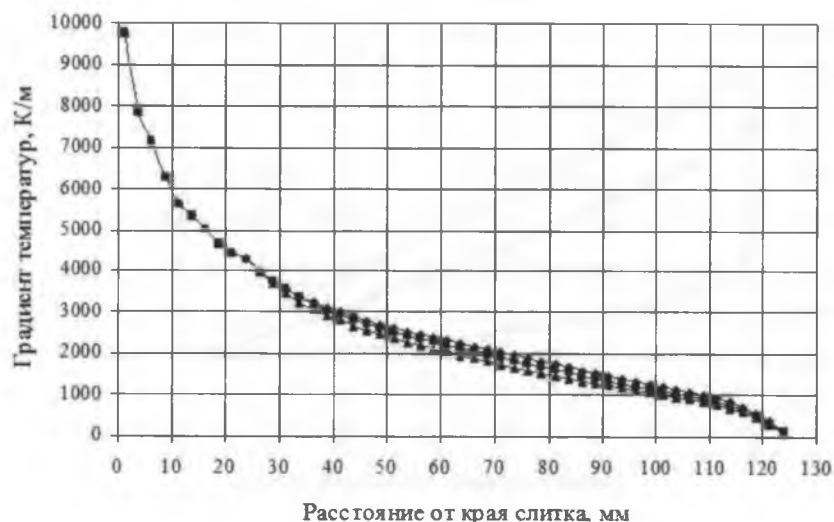


Рис. 3. Среднее значение градиента температур в двухфазной зоне:

▲ – мягкий режим, ■ – режим средней интенсивности охлаждения, ◆ – жесткий режим.



Средние значения градиента температур в двухфазной зоне и скорости кристаллизации, полученные в результате моделирования процесса затвердевания непрерывного слитка, представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно. Из рисунков видно, что применение более мягкого режима охлаждения приводит к меньшим значениям указанных параметров.

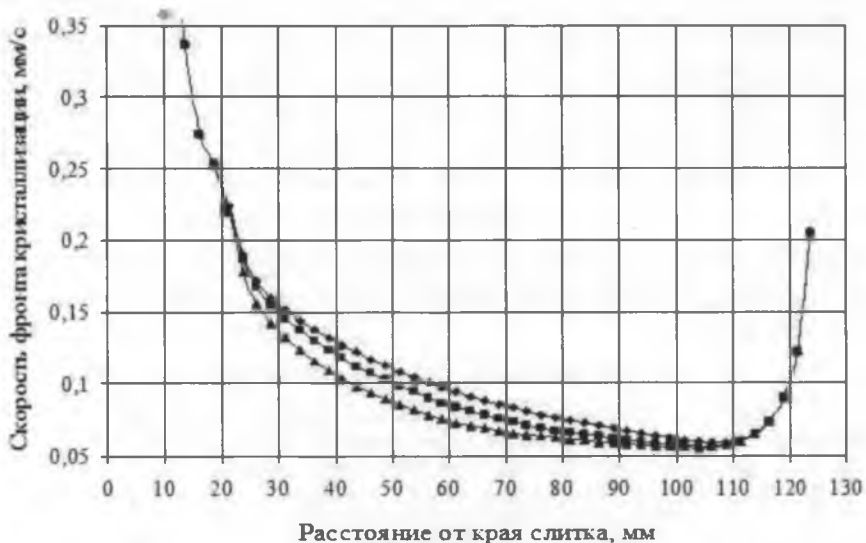


Рис. 4. Скорость движения фронта кристаллизации:

▲ – мягкий режим, ■ – режим средней интенсивности охлаждения, ◆ – жесткий режим.

Найденные по приведенной методике значения предельных скоростей деформации (рис. 5) в зависимости от способа охлаждения показывают их снижение при менее интенсивном охлаждении.

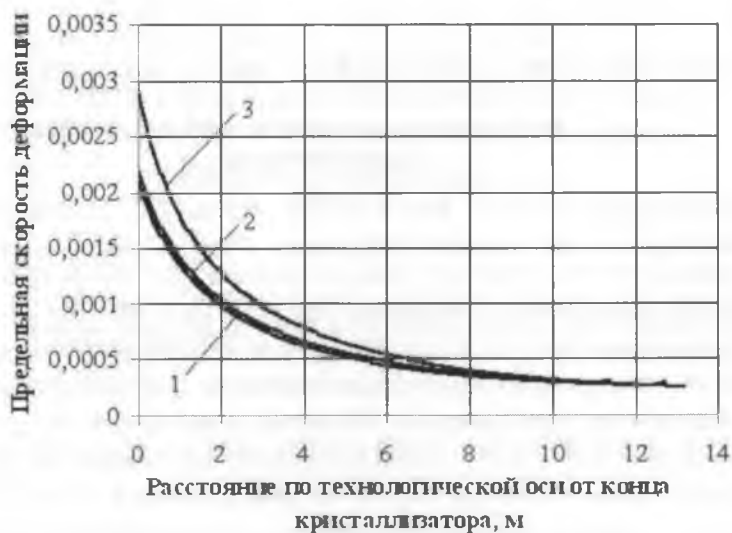


Рис. 5. Предельная скорость деформации для предотвращения образования горячих трещин:

▲ – мягкий режим, ■ – режим средней интенсивности охлаждения, ◆ – жесткий режим.



Известно, что в соответствии с законом Холла-Петча [8, 9] соотношение между пределом текучести  $\tau$  и размером зерна  $d$  описывается выражением:

$$\tau = \tau_0 + Kd^{-0.5}, \quad (7)$$

где  $\tau_0$  – напряжение, необходимое для скольжения дислокаций,  $K$  – коэффициент, характеризующий прочность блокирования дислокаций. Размер зерна, в свою очередь, определяется междендритным расстоянием, которое зависит от скорости охлаждения металла. Увеличение скорости охлаждения приводит к уменьшению междендритного расстояния, к уменьшению размеров зерна и к повышению предела текучести металла, его пластичности. Все это обеспечивает снижение вероятности трещинообразования в непрерывном слитке. С другой стороны, увеличение интенсивности охлаждения, приводящее к уменьшению расстояния между вторичными ветвями дендритов, приводит к увеличению предельной скорости деформации, увеличивая, таким образом, вероятность образования трещин.

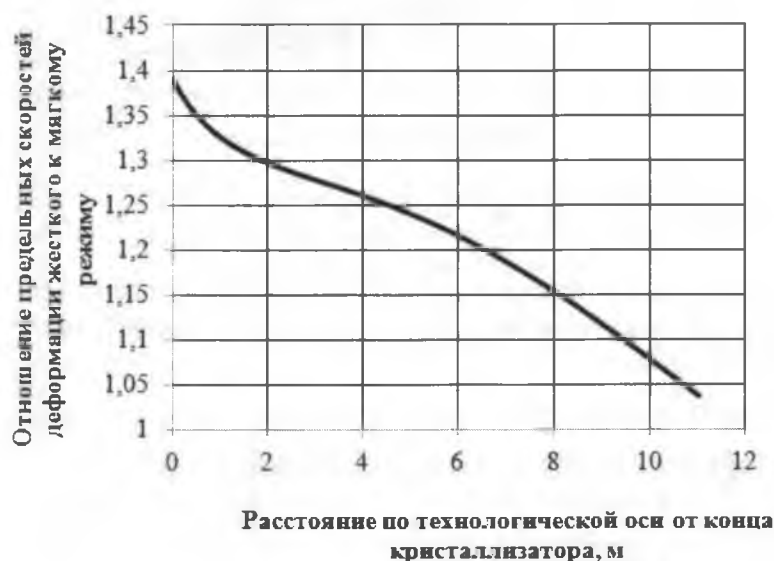


Рис. 6. Отношение предельных скоростей деформации жесткого режима к мягкому.

Сравнение отношений предельных скоростей деформации (рис. 6) для жесткого и мягкого режимов охлаждения (рис. 1) в различных зонах ЗВО позволяет сделать следующие выводы. Так, в начале ЗВО предельная скорость деформации для жесткого режима на 30-40 % выше, чем для мягкого. Различие уменьшается при движении в ЗВО вдоль технологической оси МНЛЗ. Отсюда следует, что изменение режима охлаждения влияет на предельные значения скорости деформации в поверхностном слое непрерывного слитка, а, следовательно, на склонность к образованию горячих трещин. В центральной части сляба влияние режима охлаждения на эти процессы незначительно.



**3. Выводы.** Результаты проведенных исследований показали, что, несмотря на то, что при более интенсивном охлаждении сляба возрастает вероятность появления горячих трещин в поверхностном слое металла в соответствии с изменением предельных значений скорости деформации, для оценки склонности слитка к образованию горячих трещин необходимо совместное рассмотрение решения задачи определения влияния режимов охлаждения металла на его пластические свойства и на значение предельной скорости деформации. Это позволит произвести выбор оптимального режима непрерывной разливки стали на основе сравнительного анализа скоростей деформации металла вдоль технологической оси реальной МНЛЗ и предельных скоростей деформации, полученными в результате использования предлагаемой методики.

#### Литература

1. Thomas B.G. // *Fundamentals of Modeling for Metals Processing*. – 2009. – 22А. – P.362-374.
2. Самойлович Ю.А. Микрокомпьютер в решении задач формирования непрерывного слитка / М.: Металлургия, 1977. – 160 с.
3. Самойлович Ю.А. Формирование слитка / М.: Металлургия, 1977. – 160 с.
4. Weisgerber B., Nest M., Harste K. // *Steel Research*. – 1999. – №10. – P.403-422.
5. Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка / М.: Металлургия, 1987. – 224 с.
6. Самойлович Ю.А. Системный анализ кристаллизации слитка / Киев: Наук. думка, 1983. – 248 с.
7. Коваленко О.А., Дождиков В.И. // *Современная металлургия начала нового тысячелетия: Сб. науч. тр., Часть 2* / Липецк, 2010. – С.154-159.
8. *Материаловедение: Учебник для вузов* / Под ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина / М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 648 с.
9. Гуляев А.П. *Металловедение: Учебник для вузов* / М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
10. Шаратов А.И., Дождиков В.И. Оптимизация температурных полей процессов нестационарной теплопроводности // *Вести высших учебных заведений Черноземья*. – 2008. – №3. – С.93-97.

#### INFLUENCE OF COOLING CONDITIONS ON THE PROBABILITY OF HOT CRACKING IN CONTINUOUS CAST

S.V. Poryadin, V.I. Dozhdikov, O.A. Kovalenko

Lipetsk state technical university,  
Moskovskaya St., 30, Lipetsk, 398600, Russia, e-mail: [poryadscorpio@mail.ru](mailto:poryadscorpio@mail.ru)

**Abstract.** It is proposed the method to study the influence of cooling conditions on the probability of hot cracks based on determination of limit deformation rate which is connected with the cavitation pressure and the speed of steel crystallization. It is shown the necessity of joint analysis of solutions of two problems. First is the determination of influence of cooling conditions on metal plastic properties. Second is the calculation of limit deformation rate under these conditions.

**Key words:** continuous cast of steel, optimization, control, defects in the continuous slab.