



The method of probability calculation of formation of the longitudinal cracks, formed at pouring of steel in round ingot, poured at MNLZ-1, which allows to take into account the peculiarities of plastic deformation of slug, is offered.

А. Н. ЧИЧКО, БНТУ, В. А. МАТОЧКИН, РУП «БМЗ»,
Д. М. КУКУЙ, Ю. В. ЯЦКЕВИЧ, БНТУ,
А. В. ДЕМИН, РУП «БМЗ», О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 669.27:519

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ «ПроНРС-1» ДЛЯ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ТРЕЩИН, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В ЗАГОТОВКАХ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Известно, что величина термических напряжений в движущемся слитке зависит от скорости движения заготовки, радиуса изгиба, условий ее охлаждения в кристаллизаторе и зонах вторичного охлаждения. В то же время размер сечения слитка, марка стали существенно влияют на процесс формирования термических напряжений через упругопластические свойства сплава.

В статье [1] был описан метод расчета вероятностей образования поперечных трещин по вине продольных напряжений, формирующихся при разливке стали в круглые слитки. В то же время при разливке стали наряду с продольными образуются и поперечные напряжения, которые являются причиной формирования продольных трещин. Следует отметить, что характер распределения трещин в кристаллизующемся слитке свидетельствует о том, что причина образования трещин в слитке – продольные и поперечные термические напряжения [2]. Чередование различных по величине продольных и поперечных напряжений создает сложную картину формирования трещин в слитках.

Цель настоящей работы – расчет вероятностей распределения продольных трещин в кристаллизующемся слитке в процессе его получения при непрерывной разливке стали.

Математическое моделирование и расчет поперечных деформаций и напряжений в слитке производили исходя из предположения, что каждый элемент горизонтального слоя слитка деформируется одинаково, причем тангенциальные напряжения относительно вертикальной оси отсутствуют. В этом случае задача расчета поперечных деформаций и напряжений может быть решена с использованием математических моделей, основанных на уравнениях равновесия [3–6]. Например, для плоскости XZ система уравнений имеет вид при движении слитка по оси Y :

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где σ_x , σ_z – нормальные напряжения элементов структуры по осям x , z ; τ_{zx} , τ_{xz} – тангенциальные напряжения. Напряжения вычисляли из соответствующих относительных деформаций по следующим формулам:

$$\sigma_x = \begin{cases} E_1(T)(\epsilon_x - \epsilon_{xp} - \epsilon_{xp-}), & \text{если } \epsilon_x \geq \epsilon_{u-}(T) + \epsilon_{xp} + \epsilon_{xp-} \text{ и } \epsilon_x \leq \epsilon_u(T) + \epsilon_{xp} + \epsilon_{xp-}, \\ E_1(T)\epsilon_u(T) + E_2(T)(\epsilon_x - \epsilon_u(T) - \epsilon_{xp-}), & \text{если } \epsilon_x > \epsilon_u(T) + \epsilon_{xp} + \epsilon_{xp-}, \\ E_1(T)\epsilon_{u-}(T) + E_2(T)(\epsilon_x - \epsilon_{u-}(T) - \epsilon_{xp}), & \text{если } \epsilon_x < \epsilon_{u-}(T) + \epsilon_{xp} + \epsilon_{xp-}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma_z = \begin{cases} E_1(T)(\varepsilon_z - \varepsilon_{zp} - \varepsilon_{zp-}), & \text{если } \varepsilon_z \geq \varepsilon_{u-}(T) + \varepsilon_{zp} + \varepsilon_{zp-} \text{ и } \varepsilon_z \leq \varepsilon_u(T) + \varepsilon_{zp} + \varepsilon_{zp-}, \\ E_1(T)\varepsilon_u(T) + E_2(T)(\varepsilon_z - \varepsilon_u(T) - \varepsilon_{zp-}), & \text{если } \varepsilon_z > \varepsilon_u(T) + \varepsilon_{zp} + \varepsilon_{zp-}, \\ E_1(T)\varepsilon_{u-}(T) + E_2(T)(\varepsilon_z - \varepsilon_{u-}(T) - \varepsilon_{zp}), & \text{если } \varepsilon_z < \varepsilon_{u-}(T) + \varepsilon_{zp} + \varepsilon_{zp-}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\tau_{xz} = G\gamma_{xz}, \tau_{zx} = G\gamma_{zx}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_z$ – нормальные относительные деформации по осям x, z ; γ_{zx}, γ_{xz} – тангенциальные относительные деформации; $E_1(T)$ – модуль Юнга для упругой деформации; $E_2(T)$ – модуль Юнга для пластической деформации при растяжении; $E_{2-}(T)$ – модуль Юнга для пластической деформации при сжатии; $\varepsilon_u(T)$ – предел упругости при растяжении; $\varepsilon_{u-}(T)$ – предел упругости при сжатии; $\varepsilon_{xp}, \varepsilon_{zp}$ – относительная пластическая деформация элемента при растяжении по осям x, z ; $\varepsilon_{xp-}, \varepsilon_{zp-}$ – относительная пластическая деформация элемента при сжатии по осям x, z ; G – модуль сдвига.

Накопление пластических деформаций при охлаждении и движение слитка производили по правилам:

$$\varepsilon'_{xp} = \max \left\{ \varepsilon_{xp}, (\varepsilon_x - \varepsilon_{xp-} - \varepsilon_u(T)) \left(1 - \frac{E_2(T)}{E_1(T)} \right) \right\}, \quad (5)$$

$$\varepsilon'_{xp-} = \min \left\{ \varepsilon_{xp-}, (\varepsilon_x - \varepsilon_{xp} - \varepsilon_{u-}(T)) \left(1 - \frac{E_{2-}(T)}{E_1(T)} \right) \right\}, \quad (6)$$

$$\varepsilon'_{zp} = \max \left\{ \varepsilon_{zp}, (\varepsilon_z - \varepsilon_{zp-} - \varepsilon_u(T)) \left(1 - \frac{E_2(T)}{E_1(T)} \right) \right\}, \quad (7)$$

$$\varepsilon'_{zp-} = \min \left\{ \varepsilon_{zp-}, (\varepsilon_z - \varepsilon_{zp} - \varepsilon_{u-}(T)) \left(1 - \frac{E_{2-}(T)}{E_1(T)} \right) \right\}, \quad (8)$$

где $\varepsilon_{xp}, \varepsilon_{zp}, \varepsilon_{xp-}, \varepsilon_{zp-}$ – старые значения соответствующих пластических деформаций; $\varepsilon'_{xp}, \varepsilon'_{zp}, \varepsilon'_{xp-}, \varepsilon'_{zp-}$ – новые значения соответствующих пластических деформаций.

Модель для расчета представляет собой сеть прямоугольных элементов с шагом Δx и Δz . Деформации материала в пространстве между центрами соседних элементов рассчитывали по формулам:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\Delta x + u(x + \Delta x, z) - u(x, z) - (1 + \alpha\theta)S_x(x, z)}{(1 + \alpha\theta)S_x(x, z)}, \\ \varepsilon_z &= \frac{\Delta z + w(x, z + \Delta z) - w(x, z) - (1 + \alpha\theta)S_z(x, z)}{(1 + \alpha\theta)S_z(x, z)}, \\ \gamma_{zx} &= \frac{w(x + \Delta x, z) - w(x, z) - T_x(x, z)}{\Delta x + u(x + \Delta x, z) - u(x, z)} + \frac{\varphi_y(x + \Delta x, z) + \varphi_y(x, z)}{2} - \Phi_x(x, z), \\ \gamma_{xz} &= \frac{u(x, z + \Delta z) - u(x, z) - T_z(x, z)}{\Delta z + w(x, z + \Delta z) - w(x, z)} + \frac{\varphi_x(x, z + \Delta z) + \varphi_x(x, z)}{2} - \Phi_z(x, z), \end{aligned} \quad (9)$$

где u, w – перемещения центра элемента по осям x, z ; φ_y – тангенс угла поворота центра элемента вокруг своей оси в плоскости XZ ; $\theta = T(x, z) - T_{\text{sol}}$ – остаточная температура (разность между текущей температурой и температурой солидуса); α – коэффициент линейного расширения; $S_x(x, z) = \Delta x + u(x + \Delta x, z) - u(x, z)$ – расстояние между центрами соседних элементов с координатами (x, z) и $(x + \Delta x, z)$ в момент их кристаллизации; $S_z(x, z) = \Delta z + w(x, z + \Delta z) - w(x, z)$ – расстояние между центрами соседних элементов с координатами (x, z) и $(x, z + \Delta z)$ в момент их кристаллизации; $T_x(x, z) = w(x + \Delta x, z) - w(x, z)$ – смещение центров соседних элементов с координатами (x, z) и $(x + \Delta x, z)$ в момент их кристаллизации; $T_z(x, z) = u(x, z + \Delta z) - u(x, z)$ – смещение центров соседних элементов с координатами (x, z) и $(x, z + \Delta z)$ в момент их кристаллизации; $\Phi_x(x, z) = (\varphi_y(x + \Delta x, z) - \varphi_y(x, z))/2$ – поворот соседних элементов с координатами (x, z) и $(x + \Delta x, z)$ в момент их кристаллизации; $\Phi_z(x, z) = (\varphi_x(x, z + \Delta z) - \varphi_x(x, z))/2$ – поворот соседних элементов с координатами (x, z) и $(x, z + \Delta z)$ в момент их кристаллизации.

Исходная система (9) решалась для каждого элемента модели приближенно методом касательных относительно переменных u, w, φ_y , т.е. система (9) была представлена в виде трех функций F_1, F_2, F_3 , для которых подбирались такие u, w, φ_y , чтобы $F_1 \approx 0, F_2 \approx 0, F_3 \approx 0$. Для этого вычисляли текущие значения F_1, F_2, F_3 . Затем делали небольшое приращение $\Delta u, \Delta w, \Delta \varphi_y$, для которых также вычисляли F'_1, F'_2, F'_3 . Тогда искомые приращения – $\Delta u_i = F_1 \Delta u / (F'_1 - F_1), \Delta w_i = F_2 \Delta w / (F'_2 - F_2), \Delta \varphi_{y_i} = F_3 \Delta \varphi_y / (F'_3 - F_3)$:

$$\begin{cases} \frac{\Delta \sigma_x}{\Delta x} + \frac{\Delta \tau_{xz}}{\Delta z} = F_1, \\ \frac{\Delta \tau_{zx}}{\Delta x} + \frac{\Delta \sigma_z}{\Delta z} = F_2, \\ \frac{\Delta \tau_{xz}}{\Delta z} - \frac{\Delta \tau_{zx}}{\Delta x} = F_3. \end{cases} \quad (10)$$

Ниже рассмотрен пример по определению вероятностных характеристик образования продольных трещин в непрерывнолитой заготовке. При проведении расчетов вероятности распределения продольных трещин использовали метод, опубликованный в [1]. В качестве объекта исследования была выбрана заготовка сечением в диаметре $d=140$ мм из стали Ст20. Размеры зон вторичного охлаждения и кристаллизатора соответствуют МНЛЗ-1, используемой на РУП «БМЗ». Скорость разлива принимали равной $v_1=2,2$ м/мин. Для исследования пространственного расположения дефектов было выбрано сечение $y=6$ м от уровня расплава, которое являлось результирующей суммарной деформационной составляющей движущегося слитка. Для этого сечения были приведены расчеты характеристик, связанные с вероятностью образования трещин. Для проведения расчетов использовали компьютерную программу «ПроНРС-1».

На рис. 1 приведено распределение поперечных напряжений, приводящих к образованию продольных трещин в круглом сечении слитка, движущегося со скоростью 2,2 м/мин. Как видно из рисунка, на внутренней части слитка круглого сечения ($y=6$ м) образуется значительная доля растягивающих напряжений, величина которых изменяется в интервале от 15 до 23 МПа. На внешней части слитка образуются сжимающие поперечные напряжения, значения которых достигают -30 МПа. Изменение напряжений в центральном сечении характеризуется симметричной зависимостью по направлению x при фиксированной координате $z=70$ мм, показывающей, что внутри слитка напряжения растягивающие, а по краям – сжимающие. Распределение поперечных напряжений (рис. 2) в сечении слитка $y=6$ м позволяет судить о характере и степени нагрузки только в данном сечении слитка. Картина существенно изменяется в зависимости от расположения сечения по длине слитка. Например, кольцо максимального напряжения (>10 МПа) постепенно сужается по мере охлаждения слитка, что не позволяет судить о вероятности наличия дефектов (трещин) в различных областях поперечного сечения.

На рис. 2 показано распределение относительной пластической деформации растяжения по поперечному сечению слитка на расстоянии 6 м от уровня расплава. Распределение пластических деформаций дает более четкую картину возможных трещин. Выделяются три области в виде концентрических колец, которые испытывают значительную пластическую деформацию.

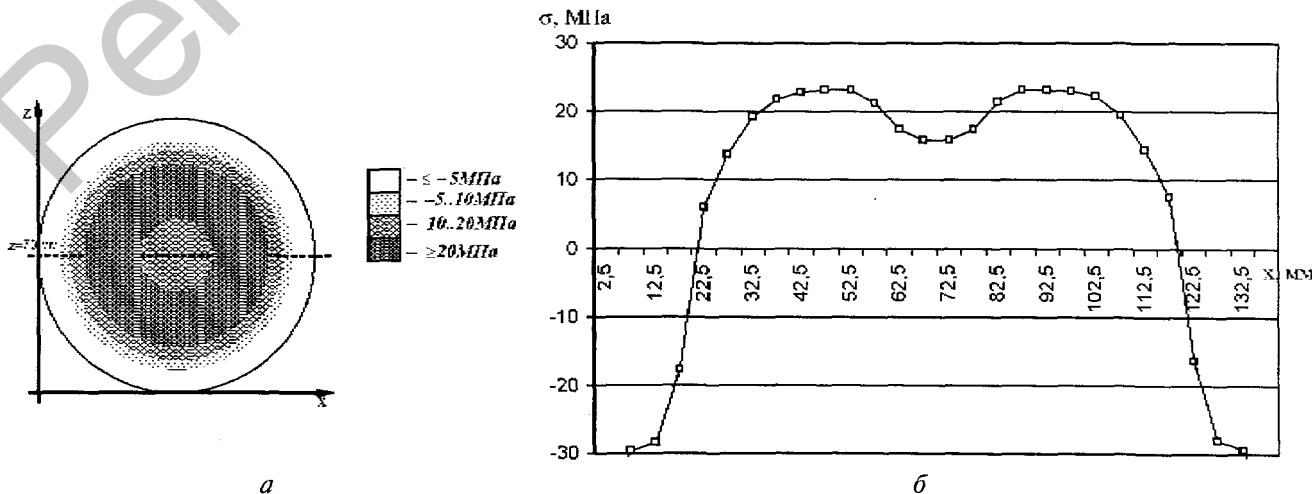


Рис. 1. Распределение поперечных напряжений, приводящих к образованию продольных трещин в круглом сечении слитка на расстоянии $y=6$ м от уровня расплава (а), и изменение их величины вдоль линии $z=70$ мм (б) этого сечения для скорости вытяжки 2,2 м/мин

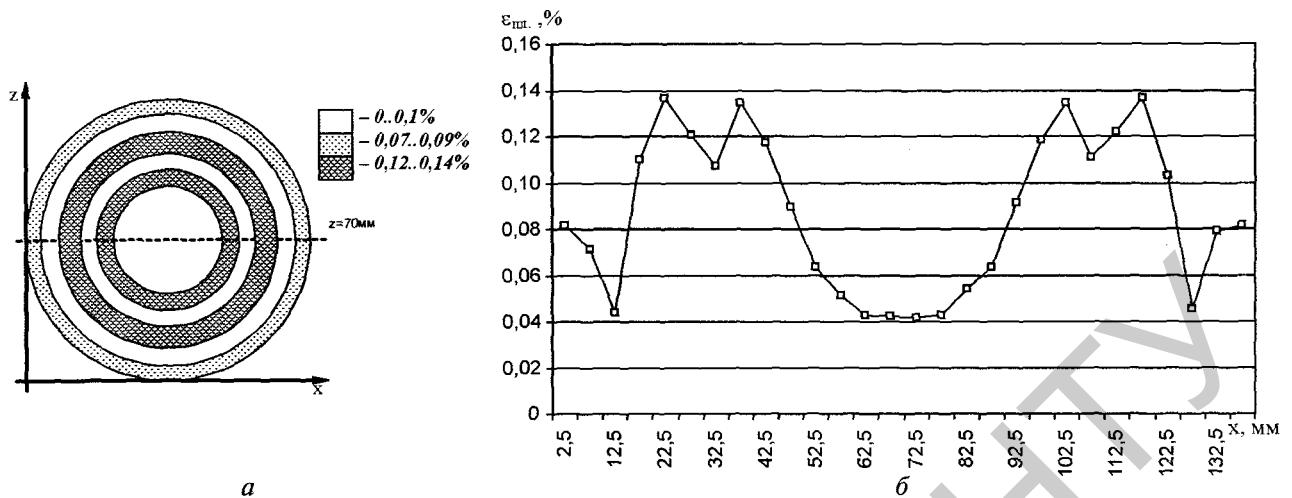


Рис. 2. Распределение относительной пластической деформации растяжения по поперечному сечению слитка на расстоянии $y=6$ м от уровня расплава (а) и изменение величины пластической деформации вдоль линии $z=70$ мм (б) этого сечения для скорости вытяжки 2,2 м/мин

Однако высокие значения деформаций не обязательно приведут к образованию продольных трещин, если эти деформации произошли в тот момент охлаждения, когда сталь имела достаточно высокие пластические свойства. Как видно из рисунка, зависимость пластических деформаций носит периодический характер для различных участков и не превышает 0,14%.

На рис. 3 приведена вероятность образования продольных трещин в поперечном сечении слитка. Как видно из рисунка, вероятность образования продольных трещин невелика и не превышает $p=6\%$. Причем вероятность образования продольных трещин изменяется по направлению x , что отражено темными концентрическими окружностями.

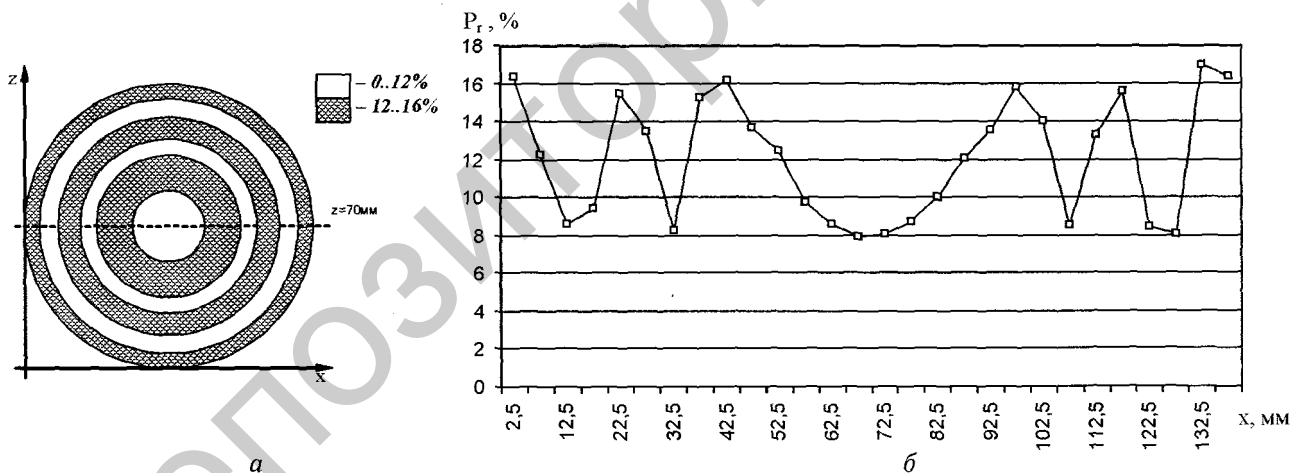


Рис. 3. Распределение вероятностей образования продольных трещин в круглом сечении слитка на расстоянии $y=6$ м от уровня расплава (а) и изменение вероятности образования продольных трещин вдоль линии $z=70$ мм (б) этого сечения для скорости вытяжки 2,2 м/мин

Для определения причин образования возможных дефектов по вине поперечных напряжений были изучены зависимости изменения пластических характеристик и предельной деформации по направлению координаты y при фиксированных значениях $x=2,5$ мм и $z=70$ мм; $x=22,5$ мм и $z=70$ мм; $x=42,5$ мм и $z=70$ мм (рис. 4). Анализ этих пространственных линий слитка связан с тем, что в этих направлениях накопление дефектов деформации наибольшее (рис. 4). При

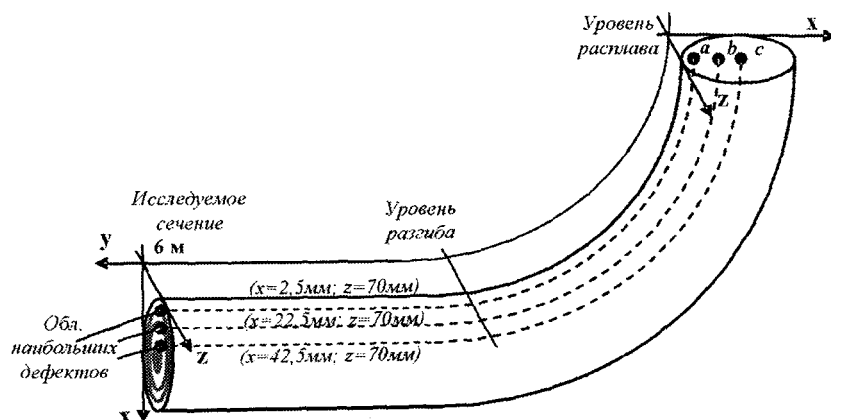


Рис. 4. Схема проведения исследований развития продольных трещин в слитки

сопоставлении этих зависимостей видно, что в каждом случае увеличение вероятности происходило скачкообразно на уровнях ~0,2, ~2,5 и ~6,5 м.

На рис. 5 представлены кривые нарастания вероятности разрыва вдоль анализируемых линий слитка. Для более детального исследования причин возникновения трещин на этих уровнях были сопоставлены значения пластической деформации растяжения, которую испытывает слиток в данной точке, со значениями предельно допустимой деформации стали при температуре, соответствующей температуре слитка в этой точке. Такой анализ показал, что на интервалах ~0,15–0,25 м вдоль направления *a*, ~2–3 м вдоль направления *b* и ~5–7 м вдоль направления *c* сталь имеет низкие пластические свойства и пластическая деформация растяжения в момент разгиба превышает уровень разрыва. Это приводит к появлению узких участков, на которых велика вероятность разрыва.

В результате проведенных компьютерных расчетов можно сделать вывод, что в слитке диаметром 140 мм из стали Ст20, получаемом на МНЛЗ-1 при скорости разливки 2,2 м/мин, существуют три области со значительным превышением вероятности возникновения продольных трещин по сравнению с остальной площадью поперечного сечения (рис. 6). Две из этих областей имеют вид концентрических колец с вероятностью наличия продольных трещин 4–6% на расстоянии 5 и 35 мм от поверхности слитка и шириной по 5 мм. Центральная круглая область с вероятностью образования трещин до 3% имеет диаметр 10 мм. Причина возникновения такого дефекта – низкая пластичность стали ($\epsilon_{пр} < 0,3\%$ при $T > 1400$ °С) в данных областях слитка в момент ее деформации под действием термостатического напряжения.

На следующем этапе исследования было проведено моделирование процесса образования дефектов, связанных с развитием поперечных напряжений и пластических деформаций, приводящих к образованию продольных трещин в слитке, движущемся со скоростью $v_2 = 1,8$ м/мин. На рис. 7 показано распределение поперечных напряжений, приводящих к образованию продольных трещин в круглом сечении слитка, разлитого со скоростью $v_2 = 1,8$ м/мин. Как видно из рисунка, в анализируемом сечении слитка выделяется область в виде концентрического кольца с высоким значением растягивающих напряжений (20–25 МПа). На количественном уровне распределение напряжений практически то же, что было получено при $v_1 = 2,2$ м/мин. В то же время пространственная конфигурация распределения напряжений различается.

На рис. 8 приведено распределение относительной пластической деформации растяжения по поперечному сечению слитка на расстоянии 6 м от уровня расплава. Как и в случае скорости 2,2 м/мин, выделяются три области в виде концентрических колец, которые испытывают локальный максимум пластической деформации. Однако само внутреннее кольцо практически исчезает (низкие значения деформаций – 0,08%).

На рис. 9 представлена рассчитанная вероятность образования продольных трещин в поперечном сечении слитка. Как видно из рисунка, распределение вероятности образования продольных трещин аналогично распределению, полученному для скорости вытяжки 2,2 м/мин.

Следует отметить, что скорость 2,2 м/мин на краях слитка дает удовлетворительные результаты по полю напряжений (16% при $v_1 = 2,2$ м/мин и 22% при $v_2 = 1,8$ м/мин). Хотя в центре слитка область

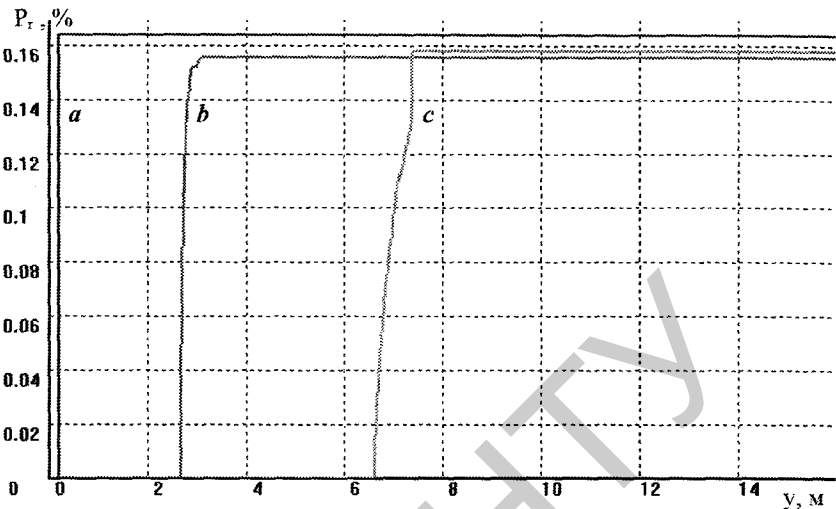


Рис. 5. Изменение вероятности образования разрыва (накопление дефектов) вдоль продольных линий слитка *a*, *b* и *c* (см. рис. 4)

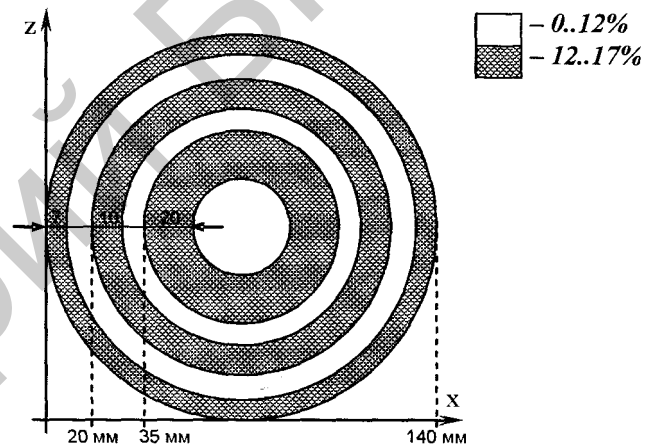


Рис. 6. Расположение областей с высокой вероятностью возникновения продольных трещин в поперечном сечении слитка

и шириной по 5 мм. Центральная круглая область с вероятностью образования трещин до 3% имеет диаметр 10 мм. Причина возникновения такого дефекта – низкая пластичность стали ($\epsilon_{пр} < 0,3\%$ при $T > 1400$ °С) в данных областях слитка в момент ее деформации под действием термостатического напряжения.

дефектов при $v_1=2,2$ м/мин широкая и имеет более высокие значения (16% при $v_1=2,2$ м/мин и 15% при $v_2=1,8$ м/мин).

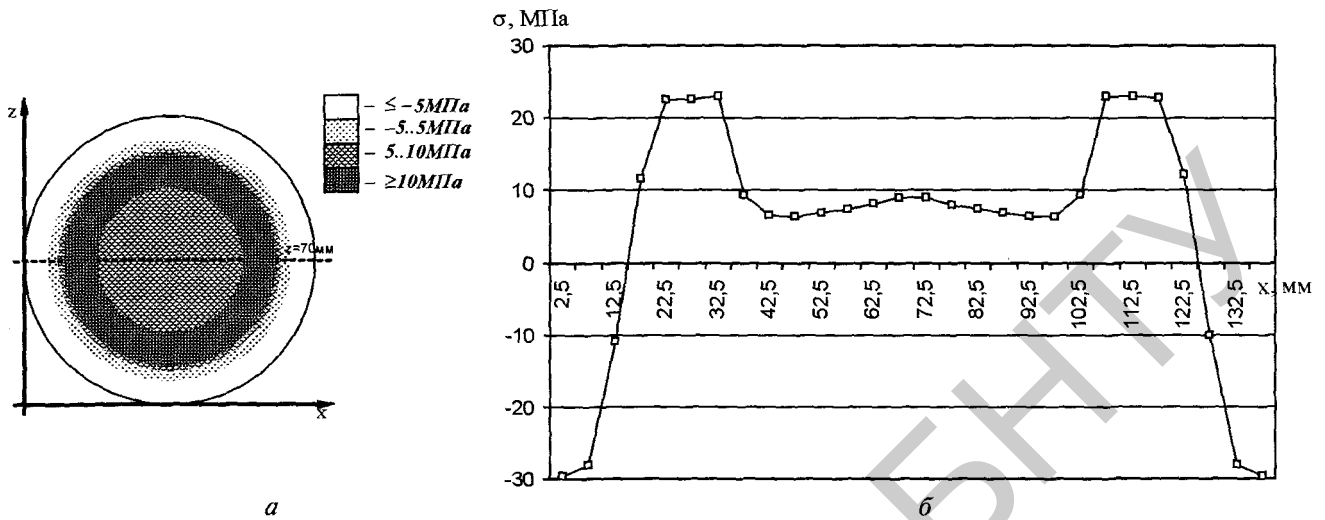


Рис. 7. Распределение поперечных напряжений, приводящих к образованию продольных трещин в круглом сечении слитка на расстоянии $y=6$ м от уровня расплава (а), и изменение их величины вдоль линии $z=70$ мм (б) этого сечения для скорости вытяжки 1,8 м/мин

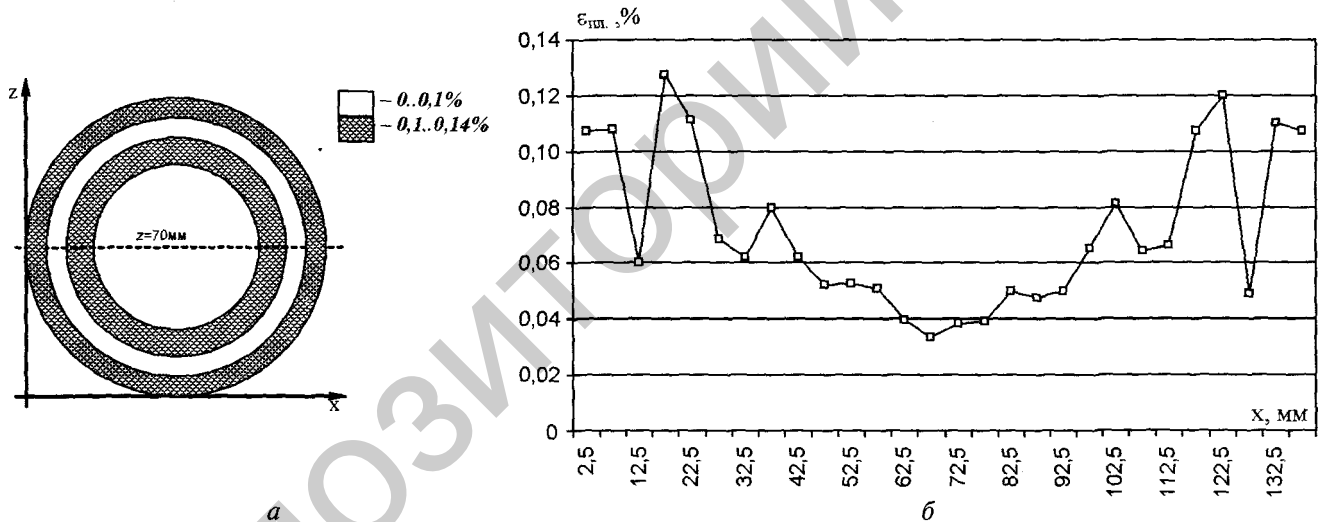


Рис. 8. Распределение относительной пластической деформации растяжения по поперечному сечению слитка на расстоянии $y=6$ м от уровня расплава (а) и изменение величины пластической деформации вдоль линии $z=70$ мм (б) этого сечения для скорости вытяжки 1,8 м/мин

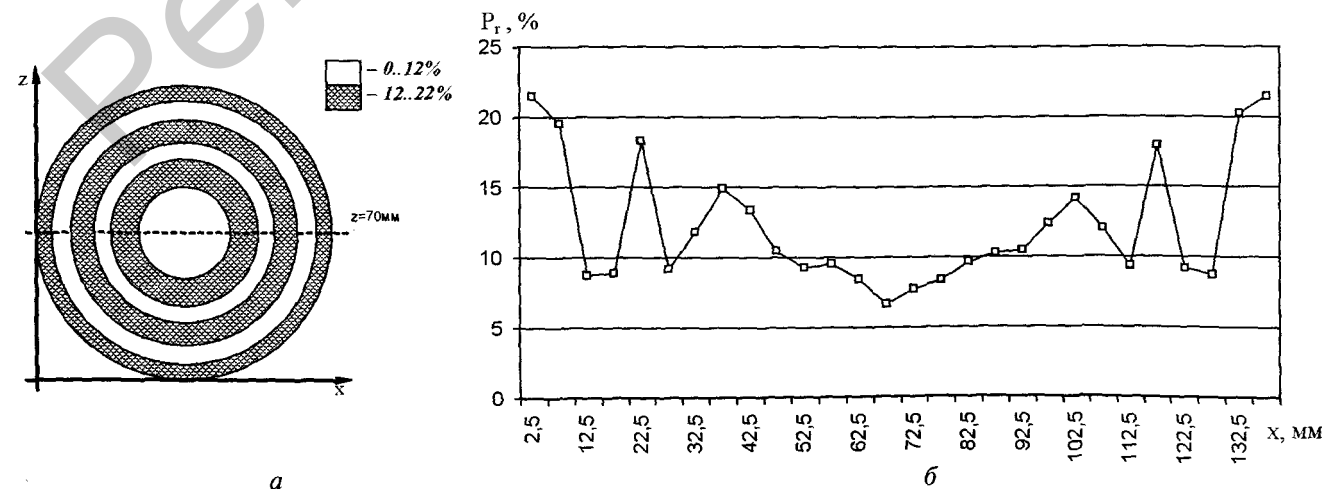


Рис. 9. Распределение вероятностей образования продольных трещин в круглом сечении слитка на расстоянии $y=6$ м от уровня расплава (а) и изменение вероятности образования продольных трещин вдоль линии $z=70$ мм (б) этого сечения для скорости вытяжки 1,8 м/мин

Таким образом, на основе анализа продольных напряжений установлено, что в области разгиба слитка в МНЛЗ-1 (5–8 м) возникает аномальный знакопеременный сдвиг механических напряжений, который может усиливаться термическими напряжениями и приводить к образованию трещин в различных сечениях слитка. В то же время повышение температур в области разгиба заготовки приводит к усилению эффекта образования трещин. Следует отметить, что в зависимости от радиуса МНЛЗ картина распределения напряжений может изменяться. Установлено, что каждый слой слитка имеет свой интервал перехода сжимающих напряжений в растягивающие. При скоростях разливки, отличных от оптимальной, при различной комбинации расхода воды могут образовываться дефекты деформационного происхождения, приводящие к образованию трещин.

Выводы

1. При различных скоростях вытяжки слитка диаметром 140 мм из стали на МНЛЗ-1 выделяются две критические области с точки зрения образования продольных трещин. Эти области имеют вид концентрических колец.

2. При увеличении скорости вытяжки вероятность возникновения трещин в крайней области может увеличиться в зависимости от температурных условий охлаждения.

3. Дефекты деформационного происхождения в виде продольных и поперечных трещин при получении слитков круглого сечения могут образовываться как при скорости разливки $v_1=2,2$ м/мин, так и при $v_2=1,8$ м/мин. В этом случае наиболее опасным вариантом является наложение механических напряжений, возникающих в процессе разгиба слитка, и термических напряжений, возникающих при охлаждении в зонах вторичного охлаждения. Это свидетельствует о том, что минимизация уровня трещин возможна лишь при оптимизации расходов воды в ЗВО, кристаллизаторе и скорости разливки и учете радиуса разгиба в МНЛЗ.

Литература

1. Чичко А.Н., Маточкин В.А., Кукуй Д.М. и др. Численное моделирование пространственного расположения поперечных трещин в слитке круглого сечения, получаемого в МНЛЗ при учете пластической деформации // Литье и металлургия. 2007. № 1. С. 26–31.
2. Мирсалимов В.М., Емельянов В.А. Напряженное состояние и качество непрерывного слитка. М.: Металлургия, 1990.
3. Чичко А.Н., Маточкин В.А., Кукуй Д.М., Муриков М.А., Демин А.В. Моделирование упругопластических деформаций при разливке стали в слитки круглого сечения // Литье и металлургия. 2006. № 2. Ч.1. С. 35–38.
4. Чичко А.Н., Кукуй Д.М., Андрианов Н.В., Яцкевич Ю.В., Чичко О.И. Моделирование влияния охлаждаемых и неохлаждаемых роликов на температуры и напряжения поверхности промышленного слитка в зоне вторичного охлаждения // Литье и металлургия. 2003. №3. С. 131–138.
5. Чичко А.Н., Бороздин А.С. Трехмерное моделирование напряженного состояния движущегося слитка при изменении граничных условий по температуре // Изв. вузов. Энергетика. 2005. №4. С. 61–67.
6. Чичко А.Н., Яцкевич Ю.В., Соболев В.Ф., Чичко О.И. Компьютерное моделирование в задачах термоупругости сложных пространственных деталей // Изв. вузов. Энергетика. 2003. № 3. С. 68–74.