

Analysis of deformations and stresses in cross section of sorted uninterruptedly-casted slugs at their solidification and cooling within limits of crystallizer with the aim of determination of possibilities for occurrence of internal cracks of diagonal type is carried out on basis of mathematical modeling, the peculiarities of the slug skin cooling at its shrinkage and separation from crystallizer wall are revealed.

Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПП «Платан»,
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, С. М. КАБИШОВ, Р. Б. ВАЙС, БНТУ

УДК 621.746.5

ВЗАИМОСВЯЗЬ РОМБИЧНОСТИ И ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ТРЕЩИН ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК

Непрерывная разливка стали в кристаллизаторы квадратного или близкого к квадратному сечений получила за последние годы значительное развитие. Основными дефектами непрерывнолитой заготовки квадратного сечения, ограничивающими применение легированной стали для изготовления ответственных изделий, являются ромбичность и внутренние трещины – угловые и диагональные. Ромбичность непрерывнолитой заготовки определяется как прогрессирующее искажение профиля твердой корочки, формирующейся в пределах кристаллизатора и измеряемое разностью длин диагоналей поперечного сечения заготовок. Исследованию процесса возникновения ромбичности непрерывнолитых заготовок посвящено большое количество публикаций [1–6].

Непосредственными измерениями [2–4] показано, что средняя толщина корочки в острых углах поперечного сечения может на 10–15% превышать толщину корочки в тупых углах. При этом на выходе из кристаллизатора различие температур поверхности заготовки, расположенных в соседних углах кристаллизатора, может достигать 350–400 °С.

Прямым следствием неравномерности толщины оболочки слитка является образование угловых и диагональных трещин, расположенных по нормали к действию максимальных растягивающих напряжений в твердой оболочке. В качестве примера на рис. 1 показана фотография излома поперечного сечения сортовой заготовки квадратного сечения с ярко выраженной диагональной трещиной [6].

За последние два–три десятилетия в заводской практике прошли апробацию различные способы по предотвращению возникновения ромбичности заготовок, в частности, выбор оптимальной конусности стенок кристаллизатора, нанесение

специальных покрытий на внутреннюю поверхность стенок, создание рифленой или волнистой поверхности стенок, изготовление кристаллизатора с открытыми углами для обеспечения равномерной интенсивности охлаждения углов заготовки. Рациональному проектированию кристаллизаторов существенно препятствует отсутствие надежной теории возникновения ромбичности, адекватной реальным условиям формирования твердой корочки. Первые попытки расчетов напряжений в твердой оболочке слитков опирались на упрощенные представления из теории балок и рам [7–11], не учитывающие многие реальные обстоятельства процесса кристаллизации стали и деформирования твердой оболочки.

Дальнейшее развитие теоретических работ в решении данной проблемы идет в направлении

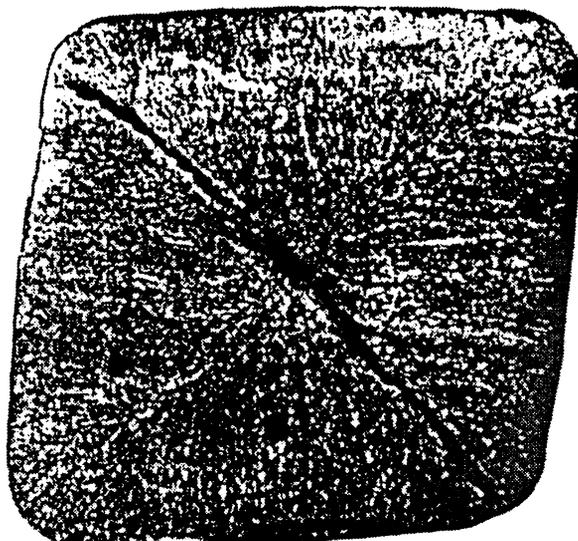


Рис. 1. Вид крупной внутренней трещины в сортовой заготовке, расположенной вдоль диагонали между тупыми углами поперечного сечения по данным [6]

использования современной нелинейной механики твердого тела в сочетании с более углубленным анализом термической картины кристаллизации стали в пределах кристаллизатора [12–15].

Настоящая работа посвящена анализу деформаций и напряжений в поперечном сечении сортовых непрерывнолитых заготовок при их затвердевании и охлаждении в пределах кристаллизатора с целью определения возможностей для возникновения внутренних трещин диагонального типа. Основное внимание уделяется условиям затвердевания стальной заготовки размерами 280x280 мм, для которой имеются экспериментальные данные относительно ромбичности поперечного сечения, полученные в производственных условиях [3, 4].

Математическая формулировка задачи включает в себя решение сопряженной системы уравнений нелинейной упругости и теплопроводности для специфических условий теплообмена между твердой корочкой слитка и стенкой кристаллизатора. Методика решения задачи теплопроводности для затвердевающей заготовки с учетом кристаллизации сплава (легированной стали) в интервале температур между ликвидусом и солидусом изложена в работе [15].

Постановка данной задачи включает уравнение нестационарной теплопроводности в декартовой системе координат:

$$\rho(T)c_{эфф}(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right], \quad (1)$$

где T – температура; t – время; ρ и λ – коэффициенты массовой плотности и теплопроводности стали; коэффициент эффективной теплоемкости $c_{эфф}(T)$ включает выражение «темпа кристаллизации» $\frac{d\Psi}{dT}$, учитывающее особенности участка диаграммы состояния изучаемого сплава:

$$c_{эфф}(T) = \begin{cases} c_{сол}(T) & \text{при } T < T_{сол}, \\ c_{сол}(T) - L \frac{d\Psi}{dT} & \text{при } T_{сол} \leq T \leq T_{лик}, \\ c_{лик}(T) & \text{при } T > T_{лик}, \end{cases} \quad (2)$$

где $c_{сол}$, $c_{лик}$ – значения коэффициентов удельной теплоемкости стали; L – теплота плавления сплава.

При задании граничных условий тепловой задачи будем исходить из следующих предположений:

- теплообмен внешней поверхности твердой корочки со стенками кристаллизатора чередуется на участках контактного теплообмена и теплообмена путем радиации через газозвоздушный зазор;

- плотность теплового потока с поверхности заготовки определяется разностью изменяющейся во времени температуры поверхности заготовки

($T_{пов}$) и неизменной во времени температуры внутренней стенки кристаллизатора ($T_k = \text{const}$);

- значения коэффициентов контактного и радиационного теплообмена считаются известными и неизменными для периода времени, в течение которого контрольное сечение заготовки перемещается в пределах кристаллизатора.

При указанных предположениях граничные условия тепловой задачи для твердой корочки заготовки имеют вид:

- на участках контактного теплообмена

$$-\lambda(T)\left[\frac{\partial T}{\partial n}\right]_{пов} = \alpha_k [T_{пов}(t) - T_k]; \quad (3)$$

- на участках радиационного теплообмена

$$-\lambda(T)\left[\frac{\partial T}{\partial n}\right]_{пов} = \sigma_v \left\{ [T_{пов}(t)]^4 - [T_k]^4 \right\}. \quad (4)$$

Уравнение (1) интегрируется при граничных условиях (3), (4) и начальном условии

$$T(x, y, t_0) = F(x, y), \quad (5)$$

где $F(x, y)$ – заданная функция координат, учитывающая наличие определенного начального перегрева расплава на мениске затвердевающей заготовки. Конкретные значения коэффициентов теплообмена α_k и σ_v , а также температуры внутренней поверхности стенок кристаллизатора T_k принимали на основании экспериментальных данных [16–18], а также на основе анализа условий теплообмена в районе кристаллизатора, выполненного в работах [9, 19]. Расчеты проведены при задании $\sigma_v = 3 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴), $T_k = 473$ К и варьировании коэффициента α_k в пределах 400–800 Вт/(м²·К).

При анализе термонапряженного состояния твердой корочки заготовки использованы основные соотношения задачи нелинейной термоупругости [20] при допущении о соблюдении условия плоской деформации заготовки.

При этом компоненты тензоров напряжений (σ_x , σ_y , τ_{xy}) и деформаций (ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy}) связаны соотношениями

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = D \left\{ \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \alpha \\ \alpha \\ 0 \end{Bmatrix} (1 + \mu)(T - T_0) \right\}, \quad (6)$$

где D – тензор упругих констант материала слитка:

$$D = \frac{E(T)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \begin{bmatrix} 1 - \mu & \mu & 0 \\ \mu & 1 - \mu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - 2\mu}{2} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Здесь $E(T)$ — модуль упругости; μ — число Пуассона; α — коэффициент теплового расширения стали.

Базовые уравнения термоупругости (6) дополняются уравнениями равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0. \quad (8)$$

Среди упругих характеристик материала заготовки наибольшее влияние на результаты расчетов оказывает способ учета изменения модуля упругости стали от температуры. На основании обобщения экспериментальных данных для различных марок легированной стали в работах [12, 21] предложено использовать следующие аналитические соотношения:

- для области низких температур (300–1050 К) согласно [12]

$$E(T) = E_0 - A(T - 273) - B(T - 273)^2, \quad (9)$$

где $E_0 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $A = 50$ МПа/град; $B = 0,06$ МПа/град²;

- для области повышенных температур (1050–1800 К) согласно [21]

$$E(T) = -4,566 \cdot 10^5 + 160(T - 273) + 3,266 \cdot 10^8 / (T - 273). \quad (10)$$

В ходе решения задачи использовали значения теплофизических и механических характеристик легированной стали: $T_{лик} = 1773$ К, $T_{сол} = 1703$ К, $L = 255\,000$ Дж/кг, $\rho = 7200$ кг/м³, $c = 690$ Дж/(кг·К), $\lambda = 35$ Вт/(м·К), $\alpha = 1,74 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹, $\mu = 0,33$.

Численное решение системы уравнений (1)–(8) осуществлено методом конечных элементов при разделении расчетной области поперечного сечения затвердевающей заготовки на достаточно большое число элементов (от 1500 до 2500). В расчетах принято, что заготовка вытягивается из кристаллизатора со скоростью 1,2 м/мин, так что для кристаллизатора высотой 1 м длительность пребывания контрольного сечения заготовки в пределах кристаллизатора составляет 50 с.

Результаты расчетного анализа приведены в виде изменения во времени температур, деформаций и компонент тензора напряжений.

В частности, на рис. 2 показано изменение во времени температур в наиболее характерных точках поперечного сечения квадратной заготовки размерами 280x280 мм при сопоставлении двух режимов теплового контакта твердой корочки со стенками кристаллизатора. Для режима № 1 (рис. 2, а) использовано предположение о плотном тепловом контакте корочки со всеми четырьмя углами кристаллизатора; для режима № 2 (рис. 2, б) принято, что тепловой контакт корочки со стенкой соблюдается для углов А и С, тогда как на углах В и D между корочкой и стенкой кристаллизатора происходит теплообмен излучением по закону Стефана–Больцмана, что является

следствием коробления корочки и возникновения газоздушного зазора между корочкой и стенкой. В правой части рисунка приведены схемы внешнего контура поверхности корочки, где участки плотного контакта корочки со стенкой выделены утолщением линий.

Графики рис. 2 позволяют выявить особенности охлаждения корочки заготовки при ее короблении и отделении от стенки кристаллизатора.

Из рисунка видно, что при симметричном (без коробления оболочки) охлаждении корочки наиболее высокая температура поддерживается посередине грани заготовки (точка E), причем графики температур в угловых точках В и С совпадают между собой.

При возникновении зазора и отделении углов В и D стенки кристаллизатора от корочки (режим № 2) наблюдается существенное повышение температуры на тупом углу корочки (точка B₁), которая на всем протяжении времени охлаждения (50 с) превышает температуру в точке F, расположенной на расстоянии 5 см от острого угла С заготовки.

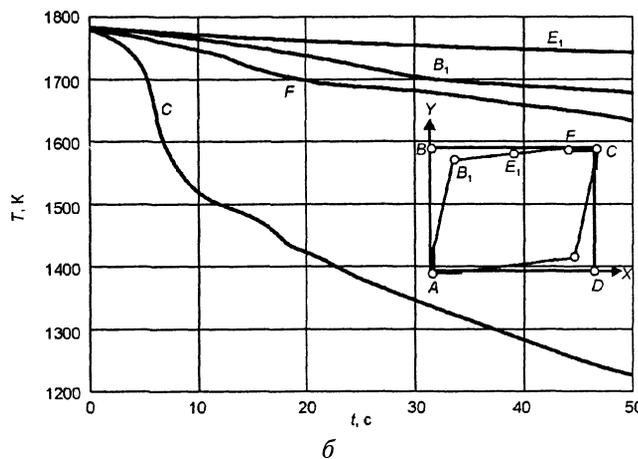
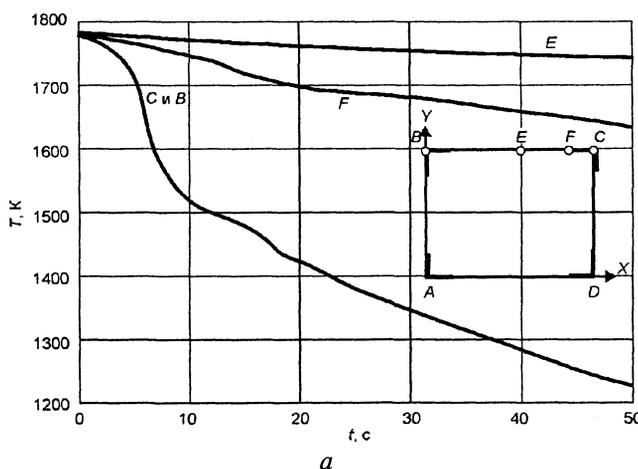


Рис. 2. Изменение температуры в характерных точках поперечного сечения заготовки из легированной стали размерами 280x280 мм для двух режимов затвердевания твердой корочки: а — при всестороннем симметричном охлаждении; б — при неравномерном охлаждении по периметру заготовки, приводящем к ромбичности

На рис. 3, 4 показано распределение температур и деформаций $\epsilon_x = \epsilon_y$ по сечению твердой корочки

вдоль диагонали AC , разделяющей два острых угла заготовки для нескольких моментов времени.

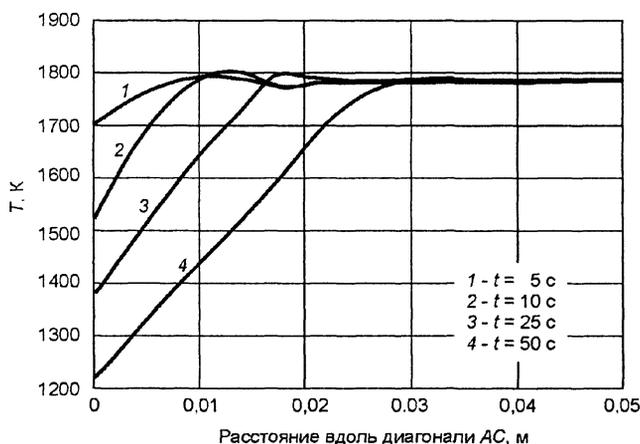


Рис. 3. Распределение температуры вдоль диагонали AC , расположенной между острыми углами поперечного сечения заготовки, для нескольких моментов времени в процессе перемещения контрольного сечения заготовки в пределах кристаллизатора

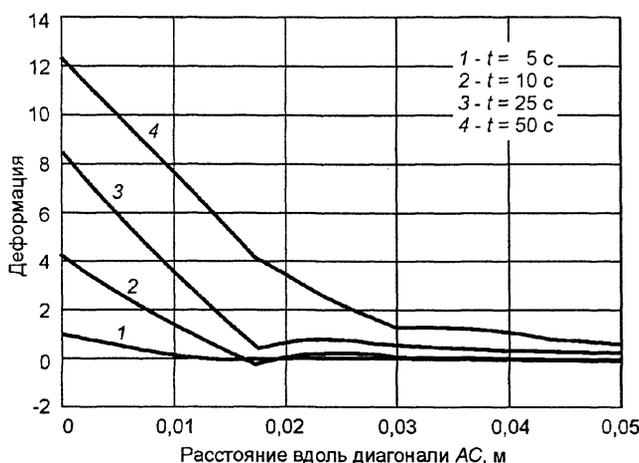


Рис. 4. Распределение деформаций заготовки вдоль диагонали AC

На рис. 5, 6 приведено изменение напряжений $\epsilon_x = \epsilon_y$ вдоль диагоналей сечения заготовки для нескольких моментов времени.

Расчеты свидетельствуют о том, что в твердой корочке возникают растягивающие напряжения в слое, непосредственно примыкающем к фронту кристаллизации, причем, как показано ниже, максимальные значения напряжений достигают предела прочности стали при температуре, близкой к солидусу сплава. Из рисунков видно, что вдоль диагонали AC , разделяющей острые углы сечения заготовки, напряжения $\sigma_x = \sigma_y$ вначале растут, достигают максимума на 25-й секунде и затем постепенно снижаются. Этот расчетный результат находится в соответствии с эмпирическими данными наблюдений [2], согласно которым максимальная степень ромбичности (разнотолщинности твердой корки по периметру) достигается на расстоянии 600–700 мм от мениска при использовании кристаллизатора высотой 1500 мм. Эффект ромбичности наиболее ярко проявляется при сопоставлении графиков распределения напряжений вдоль диагонали AC (между острыми углами) и диагонали BD (между тупыми углами) (рис. 6). Из рисунка видно, что растягивающие напряжения возникают только вдоль диагонали AC , тогда как диагональ BD , разделяющая тупые углы поперечного сечения заготовки, практически не нагружена растягивающими напряжениями.

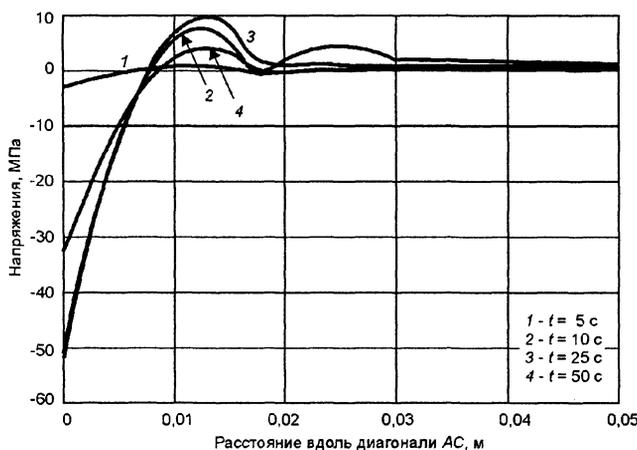


Рис. 5. Распределение термических напряжений вдоль диагонали AC поперечного сечения заготовки для нескольких моментов времени

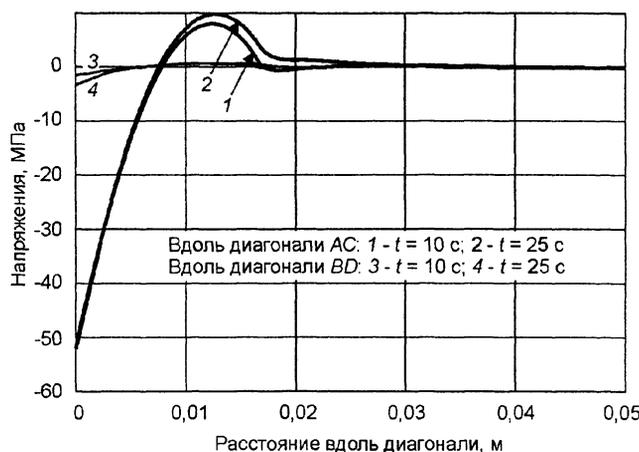


Рис. 6. Распределение напряжений вдоль диагоналей AC и BD , свидетельствующее о возникновении критических значений растягивающих напряжений вдоль диагонали AC на отрезке времени $t=20-25$ с от начала перемещения контрольного сечения в пределах кристаллизатора

Этот расчетный результат (полученный, насколько нам известно, впервые) объясняет причину расположения угловых трещин вдоль диагонали, разделяющей тупые углы, совпадающей с плоскостью максимальной податливости металла действию термических напряжений.

Действительно, как следует из расчетов (см. рис. 2), при короблении заготовки и возникновении ромбичности именно тупые углы *B* и *D* поперечного сечения заготовки находятся при температурах, на 300–400 °С превышающих температуры в острых углах сечения, что дает основание предположить наличие весьма существенного ослабления плоскости *BD* действию растягивающих напряжений, направленных по нормали к данной плоскости вдоль плоскости *AC*.

Сопоставим полученные расчетом значения растягивающих напряжений со значениями предела прочности стали при температурах, близких к нижней границе интервала кристаллизации.

По данным Ю.Я. Скока [22], полученным при испытаниях образцов стали на растяжение, при повышении температуры образцов до реального значения температуры солидуса прочность стали снижается до 0,1 МПа. Эти данные находятся в соответствии с экспериментами японских исследователей [23], согласно которым при понижении температуры испытываемых образцов на 80–100 °С ниже температуры солидуса предел прочности стали возрастает от 0,1 до 8–10 МПа.

Как следует из наших расчетов, именно такой уровень растягивающих напряжений достигается

вдоль диагонали *AC* поперечного сечения стальной заготовки при возникновении ромбичности.

Выполненный расчетный анализ позволяет дать однозначное объяснение наблюдаемым на практике данным, согласно которым угловые и крупные внутренние трещины находятся вдоль диагонали, расположенной между тупыми углами поперечного сечения непрерывнолитых заготовок.

Следует отметить, что данный вывод не ограничен условиями выполненных расчетов – квадратной конфигурацией заготовки и размерами 280x280 мм. По изложенной выше методике проведена дополнительная серия расчетов, в ходе которых исследовали термические напряжения в квадратных заготовках размерами 300x300 и 400x400 мм, а также заготовках прямоугольного сечения размерами 300x250 мм для трех моментов времени, соответствующих продвижению контрольного сечения заготовки в пределах кристаллизатора. В качестве примера на рис. 7, 8 приведено распределение температур и термических напряжений в твердой корочке заготовки размерами 300x250 мм для трех моментов времени, соответствующих продвижению контрольного сечения заготовки в пределах кристаллизатора. Графики рис. 8 подтверждают возможность достижения растягивающих напряжений порядка 6–7 МПа в сечении твердой корочки, расположенном в непосредственной близости к фронту кристаллизации, что определяет высокую вероятность нарушения сплошности металла и возникновения угловых трещин в затвердевающей заготовке.

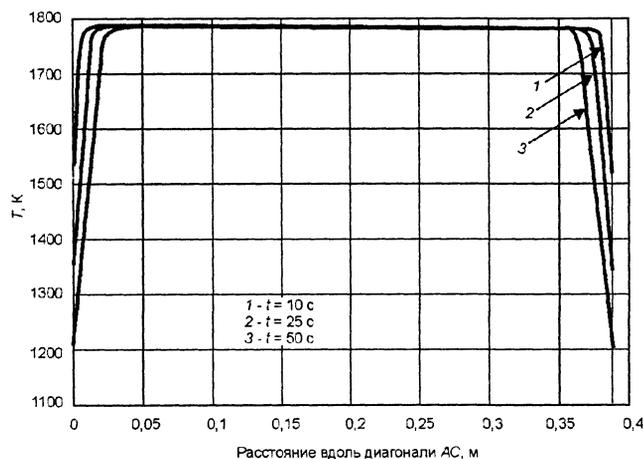


Рис. 7. Распределение температуры вдоль диагонали *AC* непрерывнолитой заготовки сечением 300x250 мм для трех моментов времени от начала перемещения контрольного сечения заготовки в пределах кристаллизатора

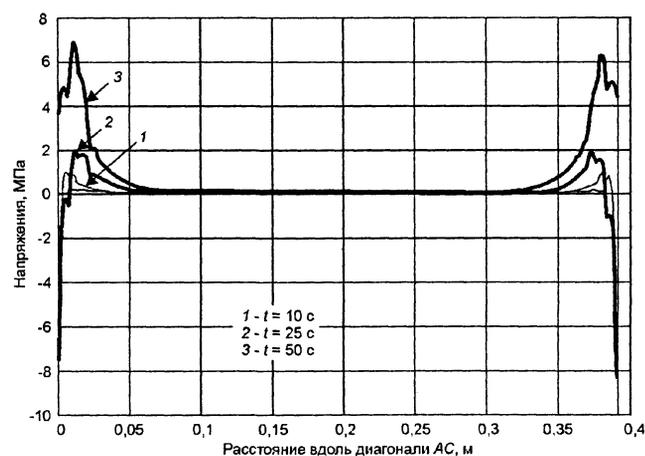


Рис. 8. Распределение термических напряжений вдоль диагонали *AC* в сечении заготовки размерами 300x250 мм для трех моментов времени от начала перемещения заготовки в пределах кристаллизатора

Литература

1. Рутес В.С., Николаев Н.А., Ахтырский В.И. и др. Образование внутренних дефектов в квадратных слитках при непрерывной разливке стали // *Сталь*. 1960. № 3. С. 212–215.
2. Мартынов В.Ф. Условия затвердевания заготовок сечением 280x320 мм и природа основных дефектов // *Разливка стали и формирование слитка*. М.: Металлургия, 1966. С. 144–150.

3. Перминов В.П., Лапотышкин Н.М., Гирский В.Е., Чижиков А.И. Предотвращение искажения профиля квадратного непрерывного слитка легированной стали // *Сталь*. 1968. № 7. С. 603–606.
4. Перминов В.П., Чижиков А.И., Гирский В.Е. и др. Опыт непрерывной отливки сортовых заготовок крупного сечения из легированной стали // *Проблемы стального слитка*. 1969. Т.3. С. 397–400.

5. Лапотышкин Н.М., Лейтес А.В. Трещины в стальных слитках. М.: Metallurgy, 1969.
6. Brimacombe J.K., Sorimachi K. Crack formation in the Continuous Casting of Steel // Metallurgical Transactions. 1977. Vol. 8B. P. 489–505.
7. Ефимов В.А. Стальной слиток. М.: Metallurgizdat, 1961.
8. Ефимов В.А., Осипов В.П., Гребенюк В.П. Пути совершенствования разливки стали. М.: Metallurgizdat, 1963.
9. Скворцов А.А., Акименко А.Д. Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки. М.: Metallurgy, 1966.
10. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Metallurgy, 1976.
11. Дюдкин Д.А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки. Киев: Техника, 1988.
12. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса. Киев: Наукова думка, 1983.
13. Дюдкин Д.А., Хохлов С.В., Кондратюк А.М. Анализ причин образования угловых трещин в непрерывнолитых плоских заготовках // Сталь. 1986. № 7. С. 37–39.
14. Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Боруменская А.Е. и др. Моделирование рациональной конфигурации поперечного сечения блюмингового слитка // Металлы. 1988. № 5. С. 81–84.
15. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Филиппов В.В. Стальной слиток. В 3-х т. Т. 2. Затвердевание и охлаждение / Под общ. ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2000.
16. Козин В.Е., Мартынов О.В., Криштал М.А. О теплообмене в зоне вторичного охлаждения при непрерывной разливке // Сталь. 1971. № 3. С. 226–228.
17. Бахнер Э., Уссар М. Условия затвердевания и температурное поле в кристаллизаторе МНЛЗ // Черные металлы. 1976. № 5. С. 3–9.
18. Вюнненберг К. Регулирование ширины кристаллизатора в процессе непрерывного литья // Черные металлы. 1982. № 13. С. 3–6.
19. Шестаков Н.И. Тепловые процессы при непрерывной разливке стали. М.: Черметинформация, 1992.
20. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1964.
21. Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Парфенов Е.П. и др. Машины непрерывного литья стали. Екатеринбург: Изд-во Уральского центра ПР «Марат», 2004.
22. Скок Ю.Я. Разрушение стали при температурах вблизи солидуса // Сталь. 1994. № 3. С. 27–30.
23. Nakagawa T., Umeda T., Murata J., Niwa N. Deformation Behavior during Solidification of Steel // ISIJ International. 1995. Vol. 35. N. 6. P. 723–729.