



An attempt of building of physical-mathematical model of thermostressed state in the shell of hardening ingot is made.

Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПП «Платан»,
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Президиум НАН Беларуси,
С. М. КАБИШОВ, БНТУ

УДК 621.746

ЭФФЕКТ ПРИЛИПАНИЯ ТВЕРДОЙ КОРОЧКИ К СТЕНКЕ КРИСТАЛЛИЗАТОРА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ СТАЛИ. Сообщение 1: ВОЗНИКНОВЕНИЕ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОЙ КОРОЧКИ

До настоящего времени основной вид брака непрерывнолитых стальных заготовок составляют различные проявления нарушения сплошности литой стали – поверхностные и внутренние трещины, возникновение которых во многом обусловлено характером термического и механического взаимодействия твердой корочки со стенками кристаллизатора. Кристаллизатор современных машин непрерывного литья стальных заготовок не случайно называют «сердцем» МНЛЗ: именно в пределах кристаллизатора закладываются основы качественной (либо дефектной) кристаллической структуры литой заготовки. Поэтому многие способы активных внешних воздействий на структуру заготовки используются в пределах кристаллизатора.

Исследованию физических явлений кристаллизации стали и возникновению разнообразных дефектов литой стали в пределах кристаллизатора посвящено огромное число экспериментальных исследований. Вместе с тем теоретические представления указанных явлений до настоящего времени остаются весьма упрощенными и не в состоянии объяснить особенности термонапряженного состояния затвердевающих заготовок, установленные эмпирическим путем.

К примеру, при использовании решений задачи термоупругости для затвердевающих стальных заготовок [1–3] получено распределение термических напряжений по сечению твердой корочки, при котором на поверхности заготовок при их монотонном охлаждении возникают сжимающие напряжения, что противоречит возможности зарождения трещин. Между тем многочисленные наблюдения свидетельствуют о том, что продол-

ные поверхностные трещины на стальных заготовках круглого и квадратного сечения зарождаются в пределах кристаллизатора и в неблагоприятных случаях являются причиной прорыва жидкой стали при выходе поврежденной оболочки слитка за пределы кристаллизатора [4–6]. По-видимому, отмеченное противоречие между результатами теоретических расчетов и эмпирическими наблюдениями состоит в том, что модели термонапряженного состояния затвердевающих слитков и заготовок недостаточно учитывают некоторые существенные особенности формирования твердой корочки слитка в пределах кристаллизатора.

В настоящей работе предпринята попытка построения физико-математической модели термонапряженного состояния в оболочке затвердевающего слитка, в соответствии с которой возникновение растягивающих напряжений в оболочке обусловлено эффектом прилипания оболочки слитка к медным плитам кристаллизатора МНЛЗ.

Следует отметить, что предположения о прилипании либо частичном приваривании твердой корочки стального слитка к медной стенке кристаллизатора высказывались неоднократно на основании измерений усилия отрыва кристаллизатора от затвердевающего слитка [7]. Однако наиболее убедительно реальное существование эффекта прилипания твердой корочки слитка к стенкам кристаллизатора было доказано экспериментами Л.С. Рудого [8, 9].

Для фиксирования контактов твердой корочки со стенками кристаллизатора в медные плиты кристаллизатора вмонтировали заподлицо с рабо-

чей поверхностью плит контакторы — стержни диаметром 6 мм из нержавеющей стали. Показания контакторов фиксировали в виде всплесков показаний осциллографа, являющегося элементом электрической цепи, включающей сухой элемент напряжения и добавочное сопротивление (рис. 1, а). Характерные показания осциллографа иллюстрируются графиком на рис. 1, б и относящимся к работе электроконтактора вблизи от мениска расплава в кристаллизаторе. Очевидно, что в момент соприкосновения жидкой стали с контактором происходит многократное замыкание и размыкание электрической цепи — до 15–20 цикл/с. Эти данные получили подтверждение при установке электроконтакторов в стенку кристаллизатора для МНЛЗ радиального типа [10].

Результаты экспериментов позволили авторам [8–10] отразить особенности термомеханического контакта твердой корочки слитка со стенкой кристаллизатора:

- эксперименты не подтвердили представлений о существовании некоторых постоянных поясов, зон по высоте стенки кристаллизатора (зона контакта жидкой стали со стенкой, зона газозоудного зазора и др.), которые входили в используемые до этих опытов модели теплообмена непрерывнолитой заготовки с кристаллизатором;

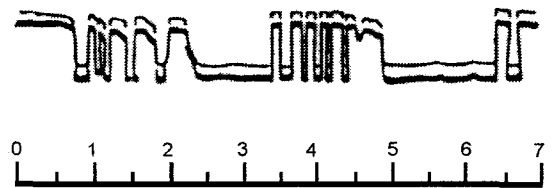
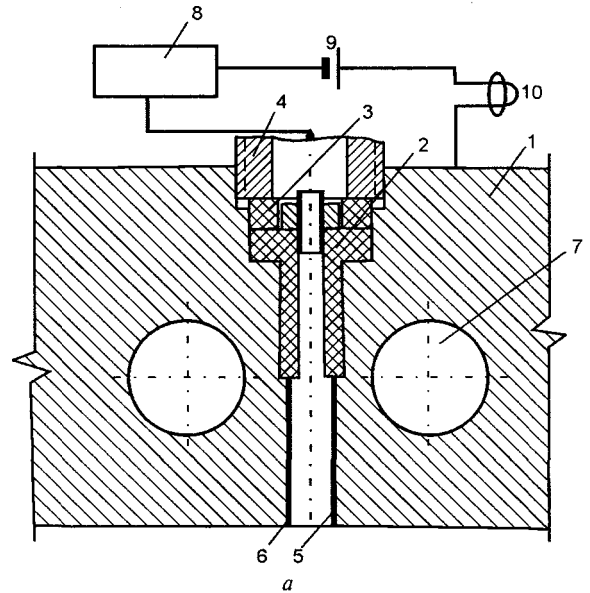
- шероховатая поверхность корочки непрерывнолитой заготовки контактирует с медными стенками кристаллизатора практически по всей поверхности корочки, расположенной в пределах кристаллизатора, хотя в нижней части кристаллизатора этот контакт ослабевает вследствие усадки заготовки;

- контакты корочки и стенки кристаллизатора носят пульсирующий, неустановившийся характер, причем частота пульсаций составляет 15–20 Гц.

Ярко выраженный динамический характер механического взаимодействия корочки слитка со стенкой кристаллизатора определяет необходимость учета динамических эффектов при построении физико-математической модели изучаемого процесса.

Следует отметить, что первый шаг в данном направлении предпринят в работе М.Я. Бровмана [11], где рассмотрено изменение во времени некоторых средних по сечению твердой корочки напряжений с учетом показателей режима возвратно-поступательного движения кристаллизатора (частоты и амплитуды). Однако исходная модель Бровмана отличается рядом существенных упрощений в постановке задачи, что не позволяет использовать результаты работы [11] для проведения количественных оценок. При построении математической модели термомеханического взаимодействия твердой корочки со стенкой кристаллизатора нами использованы следующие исходные предположения:

- рассматривается поле температур, деформаций и напряжений в твердой корочке небольшой толщины (1–2 см), образующейся в начальной



Время, с

Рис. 1. Схема электроконтактора (а) и пример осциллограммы (б): 1 — медная стенка кристаллизатора; 2 — втулка; 3 — текстолитовая шайба; 4 — гайка; 5 — электроконтактор; 6 — огнеупор; 7 — канал для воды; 8 — магазин сопротивлений; 9 — сухой элемент; 10 — гальванометр

стадии контактирования расплава стали с водоохлаждаемой стенкой кристаллизатора;

- динамика изменения основных показателей напряженно-деформированного состояния (НДС) корочки исследуется на базе совместного решения задач нестационарной теплопроводности и нелинейной термоупругости;

- численное решение указанной выше системы уравнений осуществляется методом конечных элементов при использовании достаточно малого расчетного шага по времени (0,01 с) с целью детального описания основных показателей НДС корочки для нескольких полных периодов качания кристаллизатора;

- рассматривается несколько способов учета прилипания (приваривания) корочки к стенке кристаллизатора: прилипания на выделенном локальном участке корочки (в данном сообщении), точечное пульсирующее прилипания (в последующем сообщении) и некоторые другие схемы.

На рис. 2, а показана схема выделения расчетного элемента А на стыке твердой корочки и стенки кристаллизатора, на рис. 2, б — расположение участков *ab* и *cd*, где предполагается локальное прилипания в соответствии с первой упрощенной схемой изучаемого процесса.

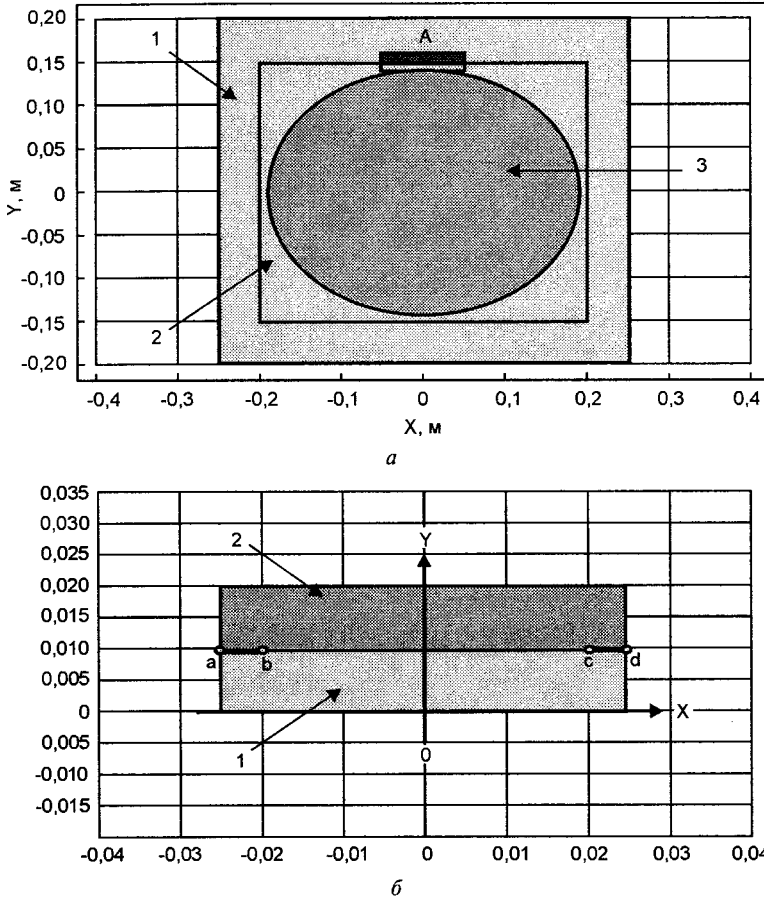


Рис. 2. Схема выбора расчетного элемента *A* на стыке твердой корочки и стенки кристаллизатора (*a*) и расположение локальных зон контакта *ab* и *cd* в расчетном элементе твердой корочки (*b*)

В общем случае необходимо исследовать показатели НДС обоих взаимодействующих объектов – твердой корочки и стенки кристаллизатора, что связано с существенным усложнением постановки задачи. Настоящая публикация посвящена анализу НДС в расчетном элементе твердой корочки слитка; вопросы деформирования и износа медной стенки кристаллизатора освещены в отдельной работе.

Определение деформаций и напряжений в твердой корочке непрерывнолитой заготовки осуществляется на базе решения уравнений Ламе [12]. В частности, для двух пространственных координат (*X*, *Y*) и времени (*t*) система уравнений Ламе в перемещениях имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(2\mu + \lambda) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} [(2\mu + 3\lambda)\alpha\delta T] = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[(2\mu + \lambda) \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} [(2\mu + 3\lambda)\alpha\delta T] = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где *u* и *v* – компоненты вектора перемещений; ρ и α – массовая плотность и коэффициент линейного расширения металла; μ и λ – коэффициенты Ламе:

$$\lambda = \frac{2\nu G}{1-2\nu}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (3)$$

где *G* – модуль сдвига; *E* – модуль упругости; ν – число Пуассона.

Компоненты тензора напряжений и деформаций связаны между собой уравнениями:

$$\sigma_x = (2\mu + \lambda) \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v}{\partial y} - (2\mu + 3\lambda)\alpha\delta T,$$

$$\sigma_y = (2\mu + \lambda) \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \frac{\partial u}{\partial x} - (2\mu + 3\lambda)\alpha\delta T,$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad (4)$$

где $\delta T = T_0 - T(x, y, t)$ – приращение температуры в процессе остывания твердой корочки; *T*₀ – некоторая условная температура, соответствующая приобретению упругих свойств на границе двухфазной зоны, обращенной к незатвердевшей части заготовки.

Температура в расчетном элементе твердой корочки определяется путем решения уравнения нестационарной теплопроводности в декартовой системе координат:

$$\rho(T)c_{\text{эфф}}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right], \quad (5)$$

где *T* – температура; *t* – время; ρ и *k* – коэффициенты массовой плотности и теплопроводности стали; $c_{\text{эфф}}(T)$ – коэффициент эффективной теплоемкости включает выражение «темпа кристаллизации» $d\Psi/dT$, учитывающее особенности участка диаграммы состояния изучаемого сплава [13]:

$$c_{\text{эфф}}(T) = \begin{cases} c_{\text{сол}}(T) & \text{при } T < T_{\text{сол}}, \\ c_{\text{сол}} - L \frac{d\Psi}{dT} & \text{при } T_{\text{сол}} \leq T \leq T_{\text{лик}}, \\ c_{\text{лик}}(T) & \text{при } T > T_{\text{лик}}, \end{cases} \quad (6)$$

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

Система уравнений (1)–(6) дополнена граничными и начальными условиями, соответствующими формированию твердой корочки затвердевающей малоуглеродистой стали в начальной стадии взаимодействия со стенкой кристаллизатора, выполненной из чистой меди. Выбор теплофизи-

ческих и термомеханических свойств затвердевающей стали достаточно полно отражен в ряде публикаций, в частности, в [13, 14].

В расчетах, результаты которых приведены ниже, размеры расчетного элемента приняты равными 50x10 мм, как показано на рис. 2, б. Специфика эффекта прилипания твердой корочки к стенке кристаллизатора отражается выбором граничных условий на охлаждаемой поверхности расчетного элемента l (в соответствии со схемой рис. 2) твердой корочки затвердевающей заготовки.

Предположим, что на участках ab и cd поверхности корочки теплообмен между корочкой и стенкой кристаллизатора протекает по конвективному механизму и характеризуется граничным условием

$$-k(T) \left[\frac{\partial T}{\partial n} \right]_{\text{пов}} = \alpha_k(t) [T_{\text{пов}}(t) - T_s], \quad (7)$$

где T_s — температура внешней поверхности медной стенки кристаллизатора; $\alpha_k(t)$ — коэффициент теплоотдачи, изменяющийся во времени периодически в соответствии с частотой качания кристаллизатора.

На участке bc поверхности корочки выполняется граничное условие радиационного теплообмена

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \sigma_b (T_{\text{пов}}^4 - T_s^4), \quad (8)$$

где приведенный коэффициент теплоотдачи излучением в зазоре между корочкой и стенкой кристаллизатора σ_b принят равным $4 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Граничное условие прилипания твердой корочки на участках ab и cd характеризуется параметром прилипания $R(t)$, изменяющимся во времени в соответствии с частотой качания кристаллизатора. Согласно упрощенной модели эффекта прилипания, используемой в данной статье, величина параметра R изменяется во времени по периодическому закону:

$$R = \begin{cases} 0 & \text{при } t = t_k, \\ R_m & \text{при } t \neq t_k, \end{cases} \quad (9)$$

где t_k — моменты тесного контакта корочки со стенкой (т.е. моменты прилипания), чередующиеся с периодом $\Delta t/2$, где Δt равен периоду колебаний, связанному с частотой качания кристаллизатора (f) соотношением $\Delta t = 1/f$. Предельное значение параметров прилипания R_m определяется на основе эмпирических данных [15, 16] относительно адгезионной связи пары разнородных металлов (медь—сталь).

На рис. 3 показано изменение во времени параметра прилипания $R(t)$ и коэффициента теплоотдачи $\alpha_k(t)$, соответствующее заданию частоты качаний кристаллизатора, равной 0,25 Гц.

В соответствии с современными представлениями [15, 16] на участках фактического контакта двух твердых тел действуют силы молекулярного притяжения, которые проявляются на расстояниях, в десятки раз превышающих межатомное расстояние в кристаллических решетках, и увеличивают-

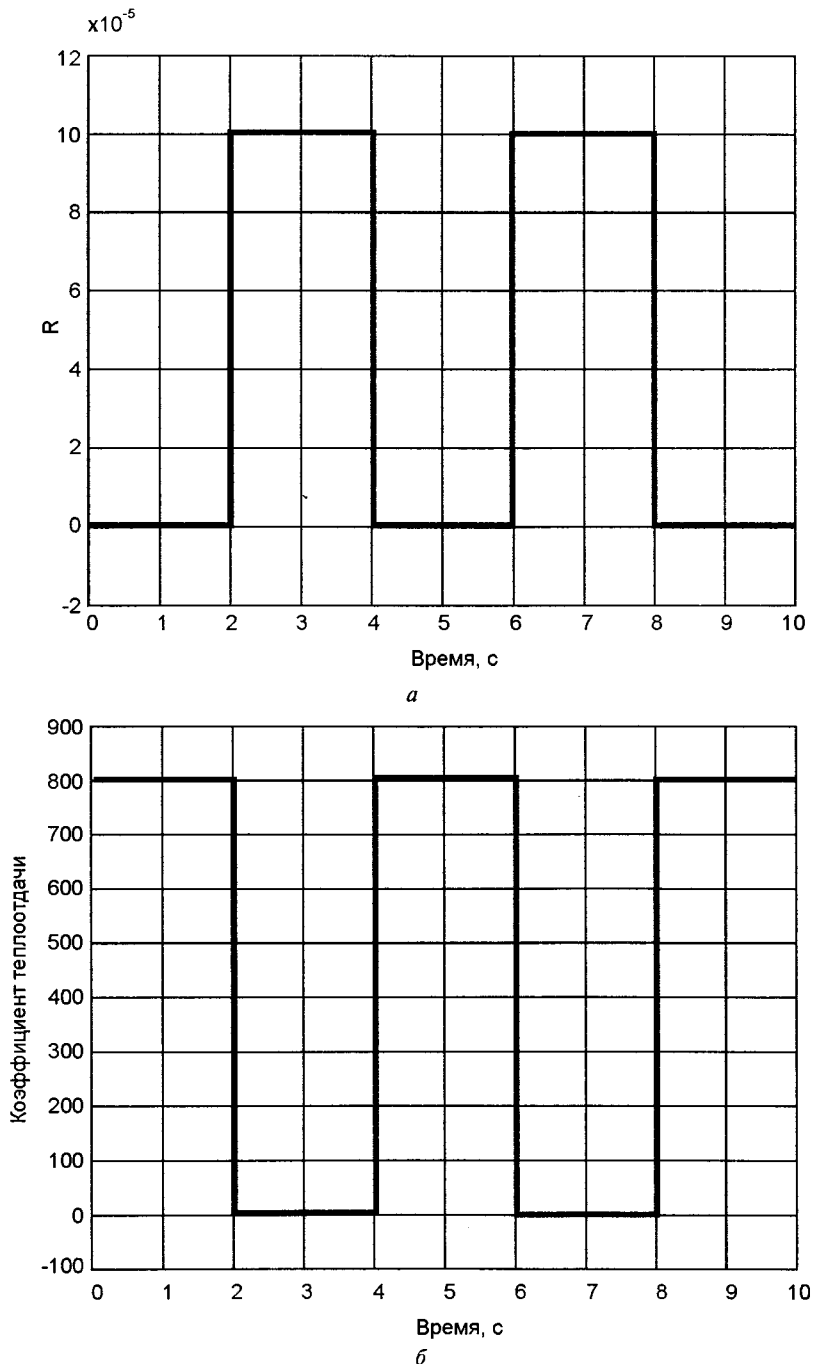


Рис. 3. Схема изменения во времени параметра прилипания R (а) и коэффициента теплоотдачи α (б) на участках прилипания ab и cd

ся по мере повышения температуры в зоне контакта. Результатом действия сил молекулярного притяжения, находящихся в контакте разнородных металлов, является так называемое «схватывание» металлов, природа которого близка к явлению холодной сварки.

В математической модели, изложенной выше, учет данного явления осуществляется путем периодического (с частотой качания кристаллизатора) изменения параметра прилипания $R(t)$ в соответствии с рис. 3. Результаты расчета локальных перемещений, деформаций и напряжений приведены на рис. 5–7.

Из приведенных рисунков можно сделать следующие выводы.

1. Начальный момент каждого эпизода прилипания (схватывания) сопровождается скачкообразным приростом всех показателей НДС изучаемого элемента заготовки, причем максимальные значения возникающих напряжений на несколько порядков больше, чем при расчете термических напряжений (рис. 4).

2. На участках прилипания (при $X=0,015$ и $0,025$ м) значения растягивающих напряжений на порядок больше, чем на участке монотонного охлаждения ($X=0$), и превышают известные эмпирические значения прочности стали при повышенных температурах. Действительно, согласно данным [17, 18], прочность углеродистой стали при температурах, близких к температуре солидуса, изменяется в пределах $0,8–1,2$ МПа и при снижении температуры на $100–120^\circ\text{C}$ возрастает на $10–15$ МПа. Из сопоставления полученных расчетом значений растягивающих напряжений в точках прилипания с указанными значениями прочности углеродистой стали можно сделать заключение о том, что каждый эпизод схватывания создает предпосылки для нарушения сплошности металла и зарождения трещин.

3. Весьма показательным является изменение во времени деформаций и напряжений в пределах каждого эпизода прилипания. Как отмечалось ранее, при решении нестационарных задач теплопроводности и нелинейной термоупругости расчетный интервал времени принимали равным $0,01$ с, в то время как интервал времени между отдельными всплесками деформаций и напряжений не превышает $0,15–0,20$ с, что дает основания для вывода о том, что расчетные изменения во времени (рис. 5–7) показателей НДС получены с достаточно высокой точностью.

Результаты численного решения системы уравнений (1)–(5) с учетом условий (6)–(9) приведены на рис. 4–7. В ходе расчетов использовали следующие значения теплофизических и механических характеристик материала (малоуглеродистой стали): $\rho=7200$ кг/м³, $k=30$ Вт/(м·К),

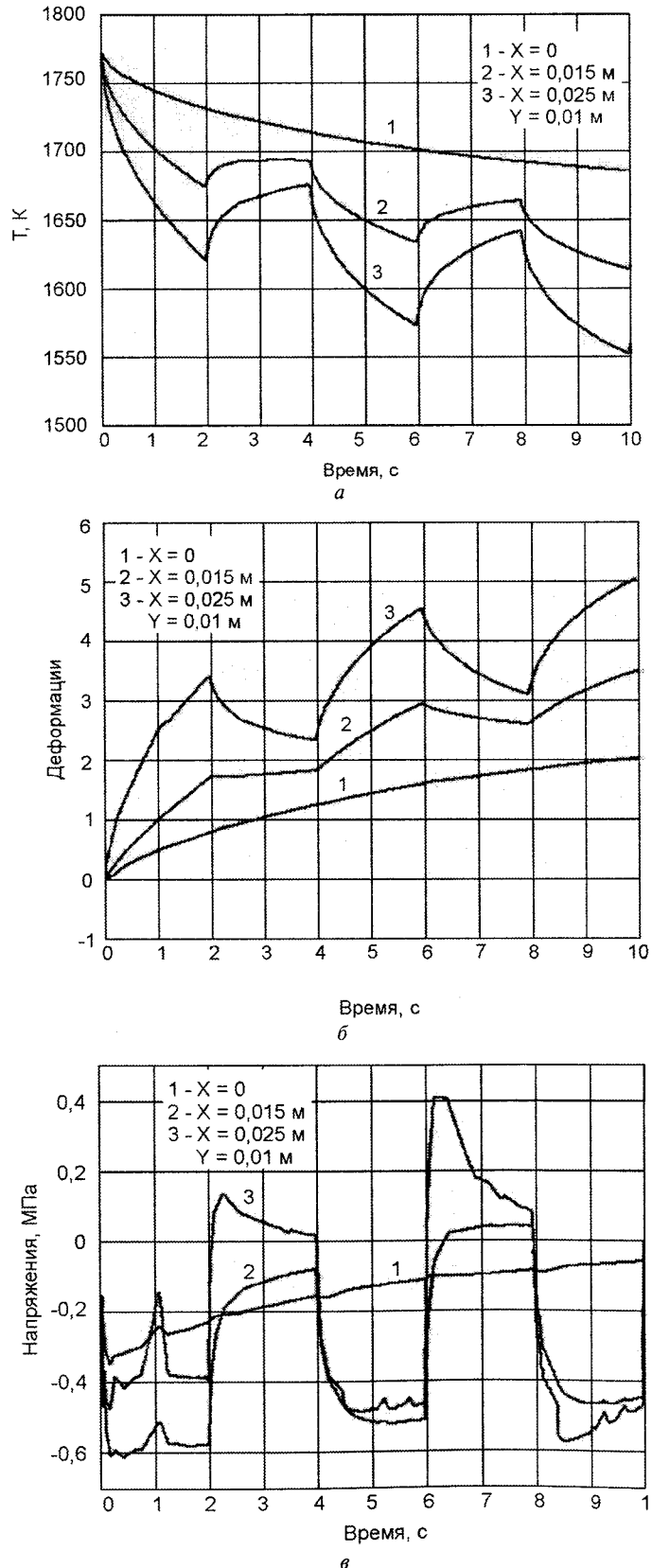


Рис. 4. Изменение во времени температур (а), деформаций (б) и напряжений (в) в трех характерных точках на поверхности расчетного элемента А при термическом контакте, но без учета прилипаемости

$L=255\,000$ Дж/кг, $(\alpha_k)_{\max}=800$ Вт/(м²·К), $\nu=0,33$, $\alpha=1,7 \cdot 10^{-5}$ 1/град.

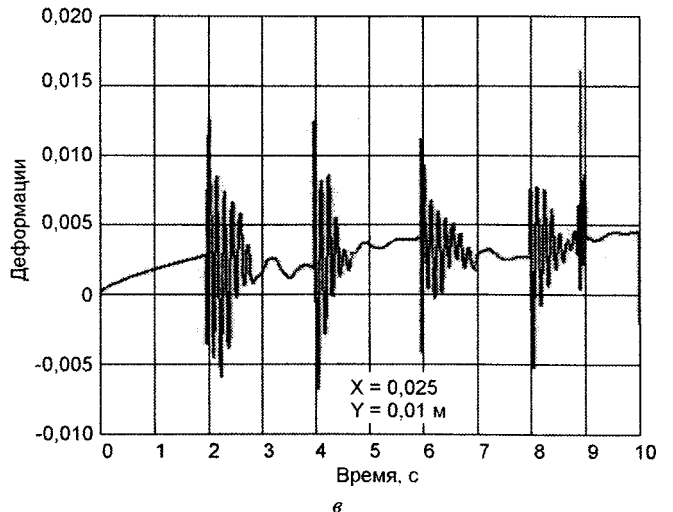
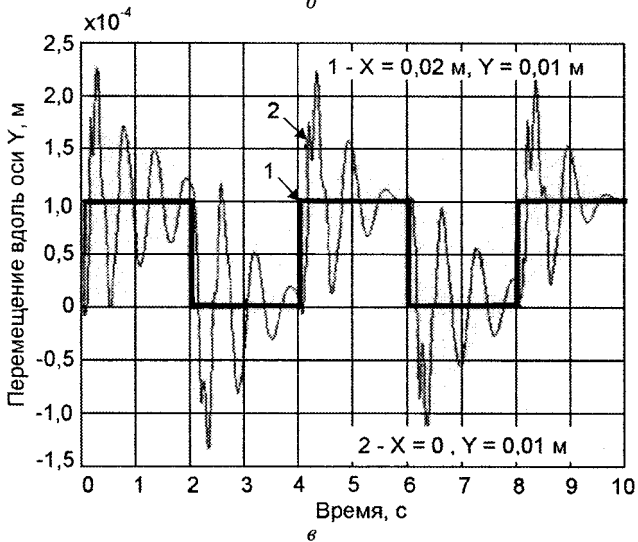
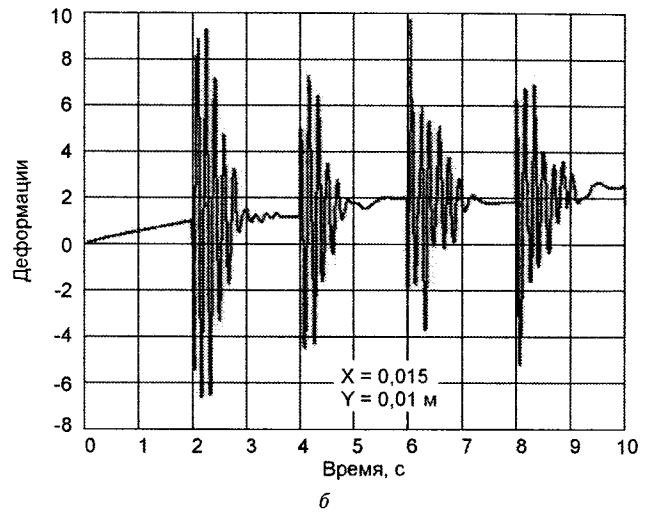
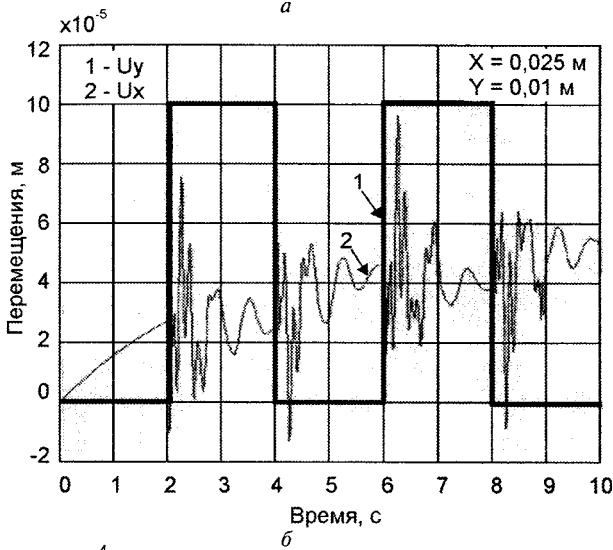
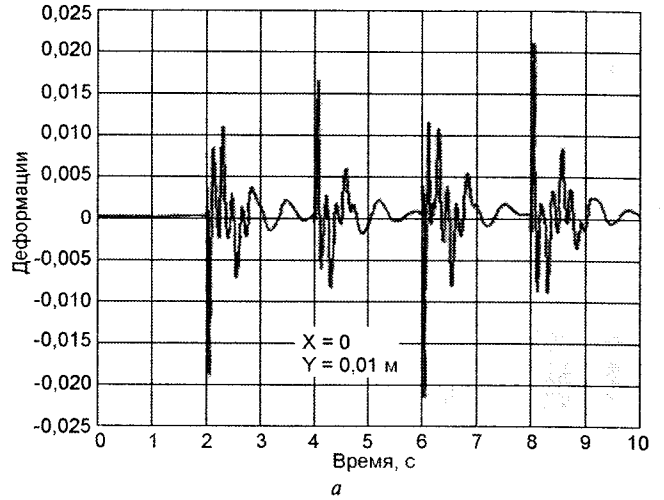
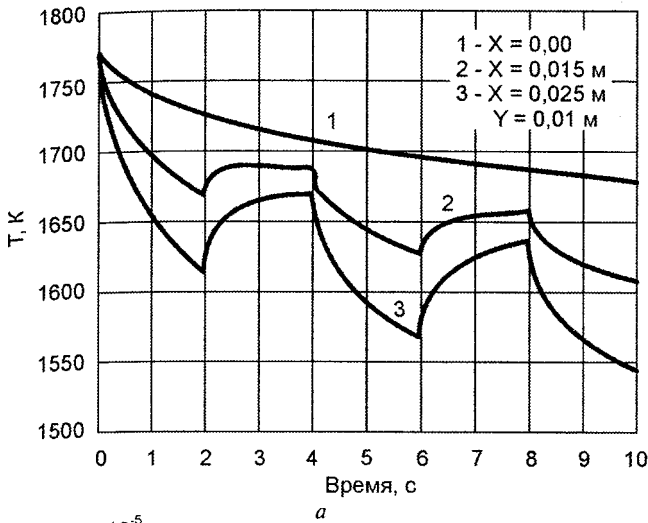


Рис. 5. Изменение во времени температур (а) и перемещений (б, в) в нескольких характерных точках в плоскости контакта при задании параметра прилипания R и коэффициента теплоотдачи α в соответствии с рис. 3

Зависимость модуля упругости стали от температуры принята для повышенных температур (1400–1750 К):

$$E(T) = -4,466 \cdot 10^5 + 160(T - 273) + 3,266 \cdot 10^8 / (T - 273), \text{ МПа.}$$

Рис. 6. Изменение во времени деформаций ϵ_x в трех характерных точках поверхности расчетного элемента А при задании параметров R и α в соответствии с рис. 3

На рис. 4 показаны изменения во времени температур, деформаций ϵ_x и напряжений σ_x в трех наиболее характерных точках охлаждаемой поверхности расчетного элемента корочки для случая, когда процесс прилипания ограничен изменением коэффициента теплоотдачи на участках прилипания, но при сохранении неизменного значения

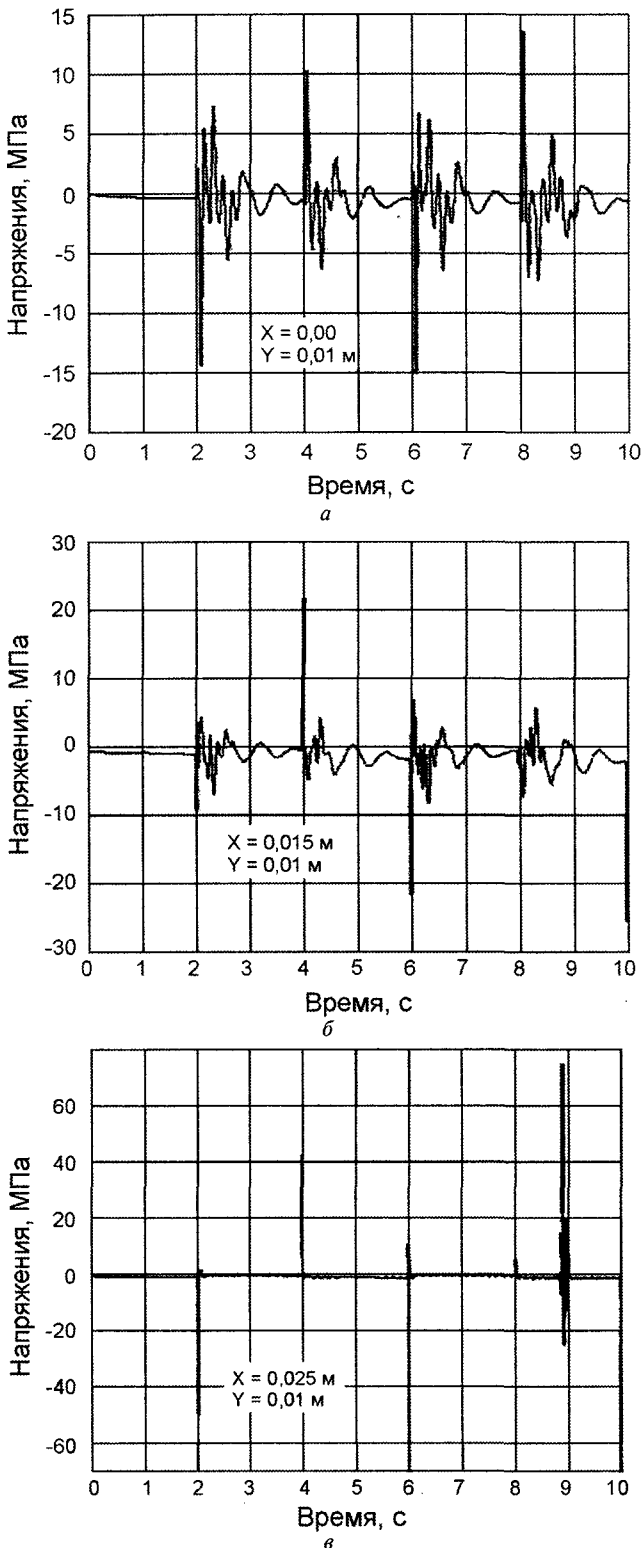


Рис. 7. Изменение во времени напряжений σ_x в трех характерных точках поверхности расчетного элемента A при задании параметров R и α в соответствии с рис. 3

параметра прилипания $R=0,0001$. Следует обратить внимание на то, что термические напряжения (рис. 4, в, кривые 1, 3) изменяются во времени по-разному для участков ab и cd (кривые 2 и 3) и посередине участка bc (кривая 1), который охлаждается путем теплообмена излучением со стенкой кристаллизатора. Возникновение растягивающих термических

напряжений на участках прилипания соответствует моментам времени, при которых происходит повышение температуры (см. рис. 4, а), в то время как для монотонно охлаждаемого участка (см. изменение напряжений согласно графику 1) характерно наличие сжимающих термических напряжений.

Таким образом, расчеты подтверждают возникновение растягивающих термических напряжений на охлаждаемой поверхности заготовки вследствие периодического разогрева отдельных участков охлаждаемой поверхности. При этом, как следует из данных рис. 4, в, абсолютные значения растягивающих напряжений недостаточно велики для нарушения сплошности металла, по крайней мере, для изученного начального периода времени (10 с).

Ситуация радикально изменяется, если при учете явлений прилипания наряду с периодическим изменением температуры на отдельных участках охлаждаемой поверхности принять во внимание механическое взаимодействие разнородных металлов (медь, сталь).

Возникновение значительных по абсолютной величине растягивающих напряжений в точках прилипания твердой корочки к стенке кристаллизатора позволяет объяснить наблюдаемое на практике образование трещин на поверхности непрерывнолитой стальной заготовки в пределах кристаллизатора. Вместе с тем следует отметить, что описание термических и механических условий прилипания твердой корочки к стенке кристаллизатора нуждается в уточнении для большей достоверности получаемых количественных оценок. Попытка такого уточнения приводится в следующем сообщении по данной проблеме.

Литература

1. Пальмов В.А. О напряжениях, возникающих при затвердевании материалов // Механика твердого тела. 1967. № 4. С. 80–85.
2. Левин М.А. Определение напряжений в затвердевающей отливке // Прикладная механика. 1968. Т. 5. Вып. 9. С. 76–82.
3. Журавлев В.А., Китаев Е.М. Теплофизика формирования непрерывного слитка. М.: Металлургия, 1974.
4. Лапотышкин Н.М., Лейтес А.В. Трещины в стальных слитках. М.: Металлургия, 1969.
5. Лейтес А.В. Защита стали в процессе непрерывной разливки. М.: Металлургия, 1984.
6. Непрерывнолитые круглые заготовки / В.Я. Генкин, А.Т. Есаулов, М.И. Староселецкий и др. М.: Металлургия, 1984.
7. Гуглин Н.Н., Гуляев Б.Б. Исследование механического взаимодействия заготовки с кристаллизатором при непрерывной разливке стали // Взаимодействие литейной формы и отливки. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 88–98.
8. Рудой Л.С., Майоров Н.П., Кушнарев И.Т. Контакт слитка со стенками кристаллизатора // Сталь. 1966. № 12. С. 1093–1095.
9. Рудой Л.С., Бамтизманский В.И. Производительность машин непрерывного литья заготовок. Киев: Техника, 1982.
10. Непрерывная разливка стали на радиальных установках / В.Т. Сладкошteeв, Р.В. Потанин, О.Н. Суладзе, В.С. Рутес. М.: Металлургия. 1974.

11. Бровман М.Я. Напряженное состояние слитка в кристаллизаторах машин непрерывного литья заготовок // *Сталь*. 1976. № 2. С. 124–129.
12. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1964.
13. *Стальной слиток: Затвердевание и охлаждение* / Под ред. В.И.Тимошпольского, Ю.А.Самойловича. Мн.: Беларуская навука, 2000.
14. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Маточкин В.А. Теоретические основы расчета температур, термовязкоупругих напряжений и деформаций в корке непрерывнолитой заготовки // *Изв. вузов и энерг. объедин. СНГ*. 2002. № 3. С. 48–56.
15. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1973.
16. Фрейдин А.С., Турусов Р.А. Свойства и расчет адгезионных соединений. М.: Химия, 1990.
17. Скок Ю.Я. Разрушение стали при температурах вблизи солидуса // *Сталь*. 1994. № 3. С. 27–30.
18. Nakagawa T., Umeda T., Murata J., Niwa N. Deformation Behavior during Solidification of Steel // *ISIJ International*. 1995. Vol. 35. N. 6. P. 723–729.