



The processes of the steel skin adherence to copper walls of crystallizer are investigated on basis of developed mathematical model on determination of occurrence (and prevention) of surface defects of uninterruptedly-casted steel slug.

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

УДК 669.1.013.046.5

ВЛИЯНИЕ ТОЧЕЧНОГО ПРИЛИПАНИЯ НА ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В СТЕНКЕ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ

Одной из наиболее актуальных задач проблематики непрерывной разливки стали является изыскание путей повышения стойкости кристаллизаторов [1]. Виды кристаллизаторов, используемых в настоящее время при изготовлении сортовых непрерывнолитых заготовок, отличаются значительным разнообразием. Помимо тонкостенных медных кристаллизаторов толщиной стенки 15–20 мм [2], используются толстостенные монолитные либо сборные кристаллизаторы толщиной стенки 40–60 мм, охлаждаемые проточной водой, протекающей по сквозным каналам, просверленным в стенках кристаллизатора. К примеру, в работе [3] изложены результаты исследования непрерывного литья стали в сортовые заготовки поперечным сечением 250x360 мм, отливаемые в сборный кристаллизатор длиной 1200 мм, стенки которого толщиной 55 мм имели сверленные каналы диаметром 20 мм. Очевидно, что термические напряжения в стенках кристаллизаторов возрастают с увеличением толщины стенки. В связи с этим при анализе прочности кристаллизаторов целесообразно в первую очередь исследовать поле деформаций и напряжений в стенках повышенной толщины. Пример такого анализа приведен в работах [4, 5], где исследованы поля температур и термических напряжений в стенке кристаллизатора толщиной 50 мм при наличии сверленных каналов для охлаждающей воды диаметром 20 мм. В работах [4, 5] неизменные во времени значения деформаций и напряжений в оболочке кристаллизатора определены (методом электро моделирования на установке ЭГДА) при стационарном распределении температур. В настоящей работе поставлена более общая задача определения деформаций и напряжений в оболочке кристаллизатора, изменяющихся во времени под влиянием пульсирующего точеч-

ного контакта оболочки с твердой корочкой стального слитка.

Следует отметить, что существование прилипания (адгезионной связи) между твердой корочкой слитка и стенкой кристаллизатора было зафиксировано в начальный период освоения машин непрерывной разливки стали. По-видимому, в работе И.Я. Граната [6] впервые введен термин «точечный контакт» между слитком и стенкой кристаллизатора. В качестве подтверждения эффекта прилипания корки к стенке кристаллизатора в работе [6] отмечена необходимость применения значительных усилий для сдергивания кристаллизатора с затвердевающей стальной заготовки. Кроме того, автор работы [6, стр. 150] отмечает: «Существование точечного прилипания свежесформирующейся корки к стенке несмазанного кристаллизатора было подтверждено выявлением тонких волосообразных металлических ниточек, располагавшихся перпендикулярно к поверхности на стенках кристаллизатора и на поверхности заготовки после выведения ее из кристаллизатора. Эти наблюдения относятся к разливке стали как в стальной, так и в медный кристаллизаторы без применения смазки». В последующем наличие точечных контактов между поверхностью стальной заготовки и стенкой кристаллизатора было подтверждено экспериментами [7–9], выполненными с использованием электроконтакторов. Эти эксперименты позволили обнаружить важную особенность эффекта прилипания — существование пульсирующих точечных контактов, частота которых превышает частоту качания кристаллизатора. Теоретический анализ подобных явлений нуждается в обобщении соответствующих задач термомеханики к виду, способному предсказать существование пульсирующих режимов деформаций и напряжений в изучаемом

объекте. Такого рода обобщение задачи нелинейной термоупругости выполнено в работе [10], где исследуется поле температур, деформаций и напряжений в тонкой корочке стального слитка, контактирующей со стенкой кристаллизатора.

В настоящей работе формализм, представленный в [10, 11], используется для анализа деформаций и напряжений в расчетном элементе медной оболочки кристаллизатора, контактирующей с твердой корочкой затвердевающей непрерывнолитой заготовки.

На рис. 1 показана схема расчетного элемента оболочки кристаллизатора в виде участка медной полосы размерами 50x300 мм, охлаждение которой проводится проточной водой, циркулирующей в отверстиях диаметром 20 мм, центры которых расположены на расстоянии 150 мм друг от друга. Постановка задачи нестационарной теплопроводности для элемента оболочки основана на использовании следующих предположений:

- поток тепла, поступающего к верхнему горизонту оболочки ($Y=50$ мм), определяется соотношением

$$q_s = -k \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_s (T_s - T), \quad (1)$$

где k – коэффициент теплопроводности материала оболочки (меди); T_s – температура поверхности твердой корки литой заготовки; α_s – коэффициент теплопередачи, среднее значение которого полагается известным на основании специальных экспериментов;

- отбор тепла, поступившего в оболочку, осуществляется в каналах круглого сечения, по которым циркулирует проточная вода, в соответствии с граничными условиями на внутренних стенках каналов:

$$q_w = -k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_w (T - T_w), \quad (2)$$

где α_w и T_w – коэффициент теплоотдачи и температура охлаждающей воды; n – нормаль к поверхности металла в каналах.

Температура в расчетном элементе оболочки кристаллизатора определяется путем решения уравнения нестационарной теплопроводности в декартовой системе координат:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (3)$$

где T – температура; t – время; ρ , c и k – коэффициенты массовой плотности, удельной теплоемкости и теплопроводности материала оболочки.

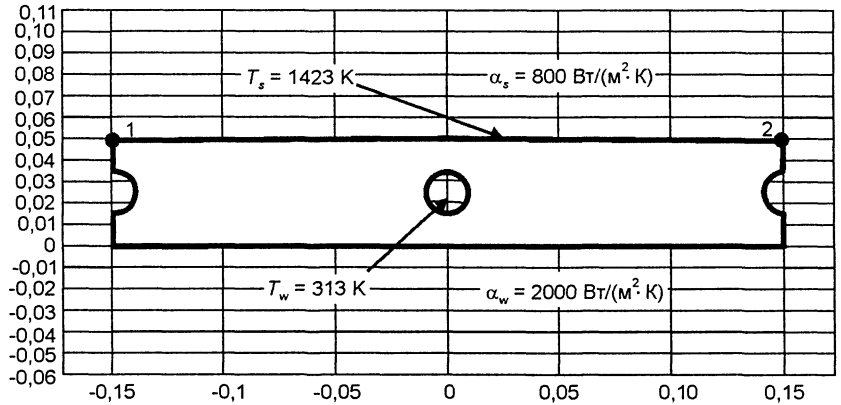


Рис. 1. Схема расчетного элемента стенки кристаллизатора

Решение уравнения (3) выполнено с учетом граничных условий (1) и (2), а также начального условия

$$T = T_0 \text{ при } t = 0. \quad (4)$$

Определение деформаций и напряжений в расчетном элементе оболочки кристаллизатора проводится на базе решения уравнений Ламе теории нелинейной термоупругости.

В частности, для двух пространственных координат (X, Y) и времени (t) система уравнений Ламе в перемещениях имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(2\mu + \lambda) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} [(2\mu + 3\lambda)\alpha\delta T] = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[(2\mu + \lambda) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} [(2\mu + 3\lambda)\alpha\delta T] = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \quad (6)$$

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

$$\lambda = \frac{2\nu G}{1-2\nu}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (7)$$

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

Компоненты тензора напряжений и деформаций связаны между собой уравнениями:

$$\sigma_x = (2\mu + \lambda) \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v}{\partial y} - (2\mu + 3\lambda)\alpha\delta T, \quad (8)$$

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

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

где $\delta T = T_0 - T(x, y, t)$ – приращение температуры в сечении оболочки.

Отметим, что наличие вторых производных от перемещений по времени в уравнениях (5) и (6) является существенной особенностью представленной модели, определяющей возможность получения решений в виде периодических функций времени.

Уравнения термоупругости (5)–(8) дополняются соответствующими начальными условиями для перемещений u и v (приняты равными нулю в момент времени $t=0$), а также условиями нагружения в угловых точках 1 и 2 (рис. 1), где задана специальная функция пульсирующего контакта $R(t)$.

Решение системы уравнений (1)–(8) выполнено численным методом конечных элементов при задании следующих исходных данных: $\rho = 8920 \text{ кг/м}^3$; $c = 420 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; $k = 350 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $E = 1,2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $\nu = 0,33$; $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$; $T_0 = 313 \text{ К}$; $T_s = 1423 \text{ К}$; $T_w = 313 \text{ К}$; $\alpha_s = 800 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $\alpha_w = 2000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Теплофизические и механические свойства материала оболочки кристаллизатора приняты для материала меди, упрочненной путем прокатки. Режимные показатели приняты на основании эмпирических данных, полученных в работах [12–14].

С использованием компьютерной программы, отражающей изложенную выше физико-математическую модель термомеханического состояния оболочки кристаллизатора, проведены две серии расчетов, результаты которых приведены на рис. 2–8.

В первой серии расчетов изучено поле температур, деформаций и термических напряжений в расчетном элементе оболочки без учета эффекта прилипания (рис. 2–4).

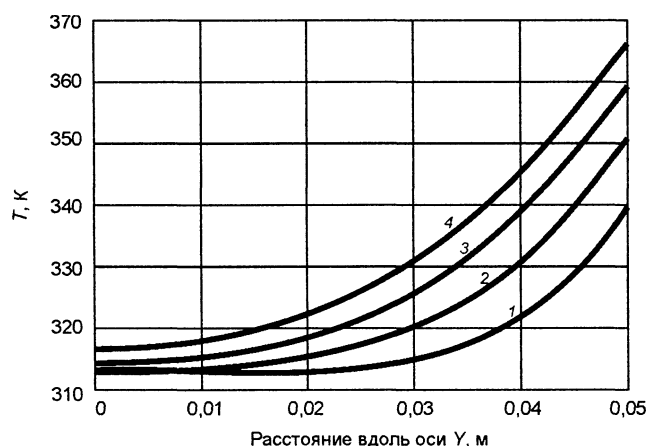


Рис. 2. Распределение температуры по высоте расчетного элемента медной плиты кристаллизатора (при $X=0,1 \text{ м}$) для последовательных моментов времени: 1 – 1 с; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4 с

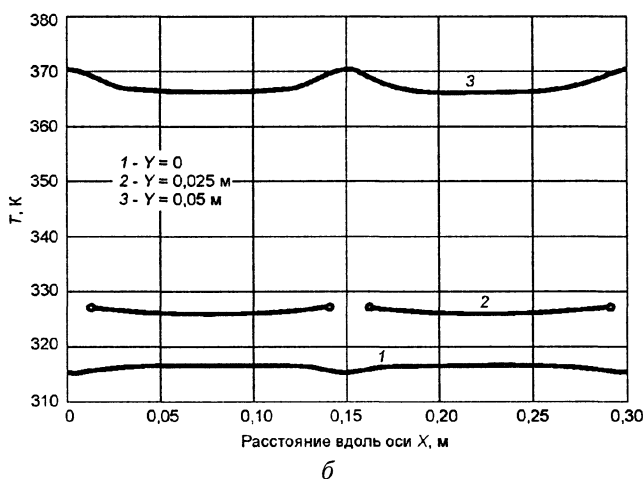
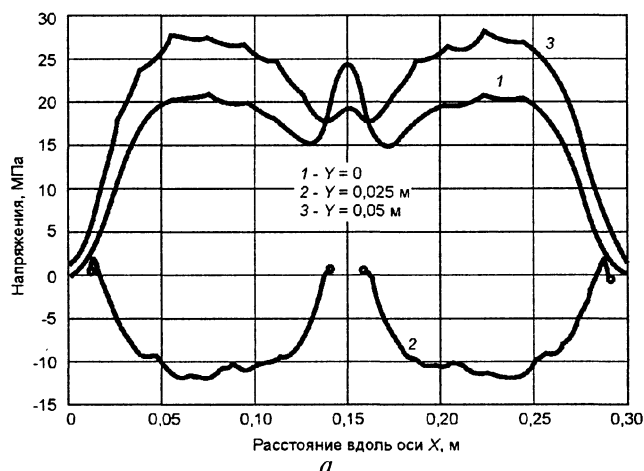


Рис. 3. Распределение напряжений σ_x и температур T вдоль трех плоскостей в сечении расчетного элемента оболочки кристаллизатора для момента времени $t=4 \text{ с}$ (прилипание не учитывается)

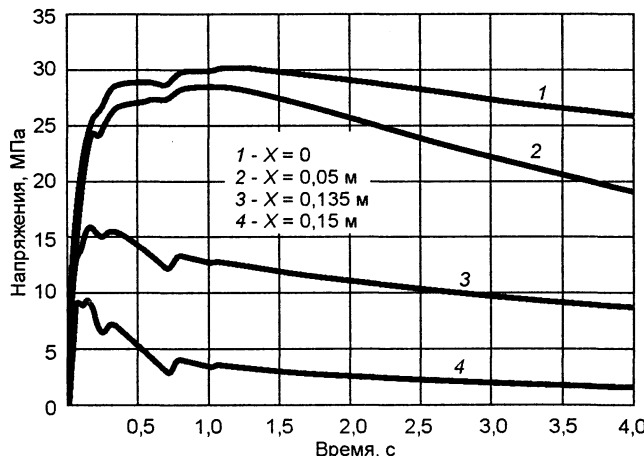


Рис. 4. Изменение во времени напряжений σ_x в нескольких точках обогреваемой поверхности оболочки кристаллизатора ($Y=0,05 \text{ м}$); прилипание не учитывается

Во второй серии представлены показатели состояния оболочки кристаллизатора при задании серии последовательных точечных контактов оболочки с твердой корочкой слитка (рис. 5–8).

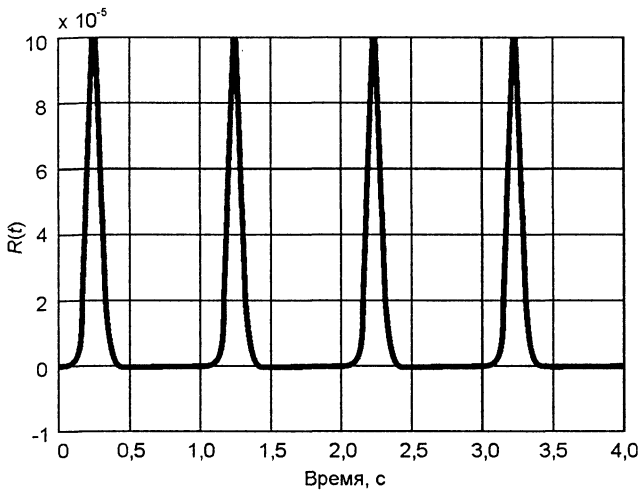


Рис. 5. Изменение во времени функции прилипания

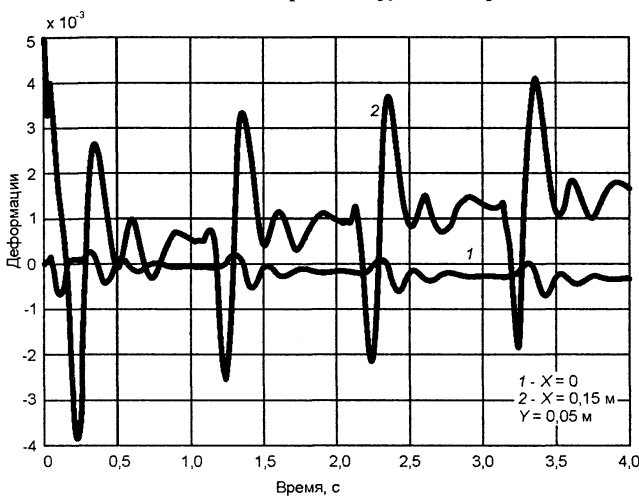


Рис. 6. Изменение во времени деформации ϵ_x в двух характерных точках расчетного элемента оболочки кристаллизатора

Приведем краткие пояснения результатов расчетов.

На рис. 2 показано распределение температуры вдоль вертикальной координаты Y для четырех последовательных моментов времени: от 1 до 4 с, а на рис. 3, б — распределение температуры по трем горизонтам расчетного элемента оболочки: для $Y=0, 0,025$ и $0,05$ м. Отметим, что температура оболочки не поднимается выше 373 К (100 °С), что находится в соответствии с результатами термометрирования [14].

На рис. 3, а и 4 приведено изменение главной компоненты тензора напряжений (σ_x) во времени и в виде распределения вдоль координаты X для трех горизонтов по высоте расчетного элемента оболочки.

Из рисунков видно, что в отсутствие эффекта прилипания термические напряжения имеют знак «плюс» (растяжение), причем их максимальные значения не превышают 30 МПа, что на порядок меньше предела прочности деформированной меди при температурах 100 – 150 °С.

При учете точечного контакта оболочки с твердой корочкой слитка математическая модель

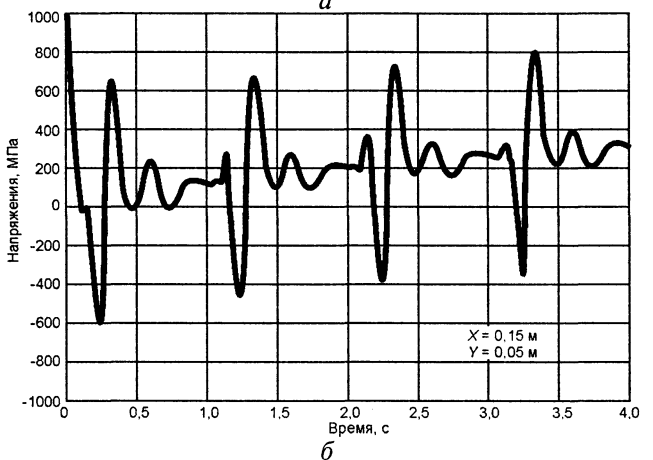
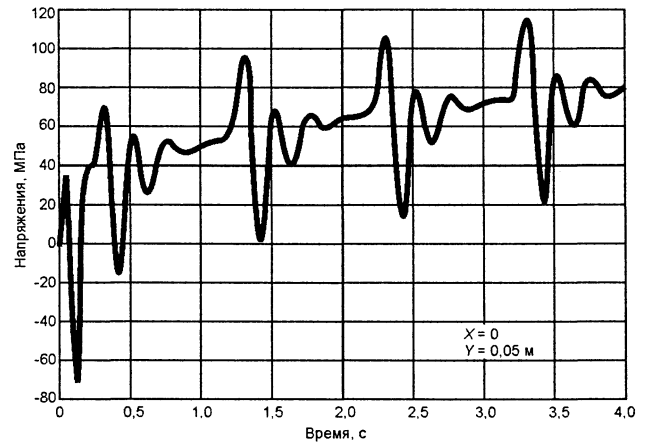


Рис. 7. Изменение во времени напряжений σ_x в центре обогреваемой поверхности (а) и в точке прилипания (б) расчетного элемента оболочки кристаллизатора

дополняется заданием функции прилипания $R(t)$, график изменения которой во времени показан на рис. 5. Основные соображения по обоснованию данной функции приведены в [11], в связи с этим здесь ограничимся кратким пояснением.

Механическое взаимодействие оболочки кристаллизатора с твердой корочкой слитка синхронизировано с режимом качания кристаллизатора. Как отмечено в работе [11], каждый цикл качания кристаллизатора включает краткий период времени, в течение которого стенка кристаллизатора движется (вниз для МНЛЗ вертикального типа) с той же скоростью, что и затвердевающая заготовка. Именно в этот краткий период времени становится возможным прилипание корочки слитка к медной стенке кристаллизатора, если этому не препятствуют принятые меры конструктивного характера (шлаковый гарниссаж, специальное покрытие оболочки и др.). Как отмечено в работах [10, 11], устройство качания кристаллизатора проектируется таким образом, чтобы упомянутый период времени возможного прилипания корочки был минимальным.

Для нашей модели принято допущение о том, что точечный контакт оболочки слитка со стенкой кристаллизатора осуществляется в точках 1 и 2 (см. схему на рис. 1) с периодом $\Delta t=1$ с, что соответствует частоте качания кристаллизатора $f=1$ Гц.

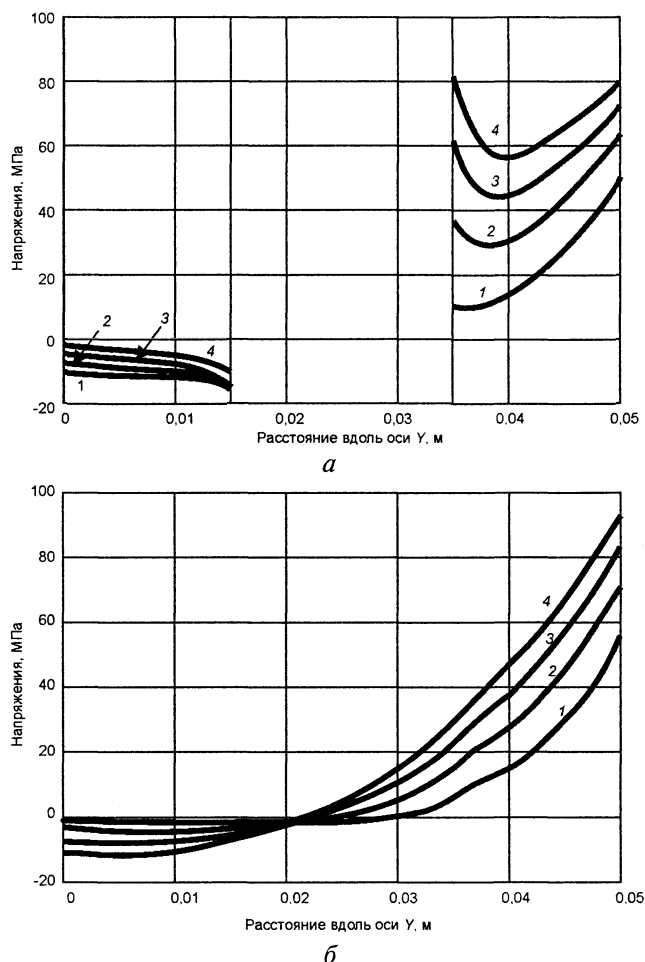


Рис. 8. Распределение напряжений σ_x в двух вертикальных сечениях расчетного элемента оболочки кристаллизатора: при $X=0$ (а) и при $X=0,1$ м (б) для четырех моментов времени: 1 – 1 с; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4 с

В моменты точечного контакта проводится «замораживание» (закрепление) всех перемещений оболочки в указанных точках расчетного элемента. Как показано на рис. 6, 7, изменение деформаций и напряжений в характерных точках расчетного элемента происходит во времени в режиме колебаний с периодом качания кристаллизатора. Вместе с тем, внутри каждого периода качания переменные ϵ_x и σ_x изменяются в режиме затухающих колебаний, что обусловлено учетом релаксации напряжений.

Отметим, что при численном решении системы уравнений (1)–(8) используется расчетный интервал времени $\Delta t=0,01$ с, тогда как период времени между локальными пиками деформаций и напряжений исчисляется десятками долями секунды, что дает основания предположить, что численное решение задачи осуществлено с достаточно высокой точностью.

Главный результат расчетного анализа, зафиксированный графиками на рис. 7, состоит в том, что максимальные растягивающие напряжения возникают в точках контакта твердой корки слитка со стенкой кристаллизатора. Отметим, что предел прочности меди при температурах, не превышающих

100–200 °С, составляет 220–240 МПа [15]. Из рисунка следует, что экстремальные значения растягивающих напряжений в медной оболочке кристаллизатора на каждом цикле качания кристаллизатора в 2–3 раза превышают предел прочности меди. Это означает, что при точечном контакте твердой корочки стального слитка с обнаженной медной стенкой кристаллизатора в точках контакта создаются предпосылки для вырывания частиц меди из стенки и последующего распространения меди по поверхности непрерывнолитой заготовки.

Практическое значение этого результата относится, в первую очередь, к осмыслению важности применения способов защиты поверхности медных кристаллизаторов от непосредственного контакта с твердой корочкой стальных непрерывнолитых заготовок. В настоящее время для этой цели широко используются защитные шлакообразующие смеси [14, 16–18]. Создание жидкой шлаковой прослойки между стенкой кристаллизатора и твердой корочкой стальной заготовки способствует более равномерному теплоотводу от поверхности корочки и препятствует прилипанию корочки к медной стенке. Однако поддержание жидкой шлаковой прослойки в зазоре между корочкой слитка и стенкой кристаллизатора в течение длительного времени остается весьма трудной задачей ввиду неизбежных нарушений равномерного процесса непрерывного литья по технологическим причинам.

Более надежным, но вместе с тем и более дорогостоящим способом предотвращения процесса прилипания является электролитическое нанесение покрытий на рабочую поверхность медных плит кристаллизатора (алитирование, хромирование, борирование) либо изготовление рабочей оболочки кристаллизатора из сплавов, обладающих более высокой прочностью по сравнению с медью. В связи с этим заслуживают внимания результаты исследований, представленные в работе [19], где упоминается об изготовлении оболочки кристаллизатора из молибденовых плит толщиной 10 мм при непрерывном литье стальных листовых заготовок толщиной 130 мм. Как отмечено в работе [19], повышение стойкости кристаллизатора достигается не только при использовании монолитных молибденовых плит, но и при более экономичном способе повышения стойкости медного кристаллизатора, рабочая поверхность которого была защищена тонким слоем молибдена, нанесенным методом напыления. Следует отметить, что предупреждение процесса прилипания стальной корочки к стенке кристаллизатора обеспечивает не только повышение срока службы кристаллизаторов, но и сокращение поверхностных дефектов стальной заготовки. К настоящему времени имеется достаточно подтверждений тому, что возникновение паукообразных трещин на

поверхности стальных непрерывнолитых заготовок связано с проникновением меди в естественные дефекты поверхности твердой корочки, происходящим в период пребывания корочки в пределах кристаллизатора [19–21].

Действительно, появление мелких частиц меди в зазоре между корочкой и стенкой кристаллизатора, обусловленное вырыванием меди из стенки при точечном контакте, неизбежно сопровождается расплавлением частиц меди, поскольку температура поверхности стальной заготовки в кристаллизаторе превышает температуру плавления меди (1083 °С). Возникновение жидкой пленки меди на поверхности стальной заготовки неизбежно влечет за собой быстрое растекание меди по шероховатой поверхности заготовки и проникновение ее в мелкие поверхностные трещины. В действие вступает известный механизм «избирательного переноса», открытого Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским [22], в соответствии с которым жидкая медь способствует интенсивной фреттинг-коррозии и образованию разветвленных трещин на поверхности литых заготовок, которые принято называть паукообразными или звездообразными.

Таким образом, значимость исследований прилипания стальной корочки к медным стенкам кристаллизатора выходит за пределы решения проблемы повышения стойкости кристаллизаторов МНЛЗ, поскольку касается и вопросов возникновения (и предупреждения) поверхностных дефектов непрерывнолитой стальной заготовки.

Литература

1. Кононов Б.З. Пути снижения расхода меди для изготовления и ремонта кристаллизаторов УНРС // Проблемы стального слитка. Т. 4. М.: Металлургия, 1969. С. 596–599.
2. Тарман Б., Клейнхагауэр О. Промышленные опыты с тонкостенными бесшовными кристаллизаторами для непрерывной разливки // Черные металлы (пер. с нем.). 1961. № 2. С. 51–61.
3. Кан Ю.Е., Шоршин В.Н., Поляков В.В. и др. Исследование непрерывной разливки низколегированной конструкционной стали в кристаллизаторы сечением 250х360 мм // Непрерывная разливка стали / Под ред. О.В. Мартынова. М.: Металлургия, 1970. С. 286–295.
4. Чижиков А.И., Гирский В.Е., Перминов В.П. и др. Термические напряжения в корке заготовки и медной облицовке кристаллизатора и пути их снижения // Проблемы стального слитка. Т. 4. М.: Металлургия, 1969. С. 516–520.
5. Чижиков А.И., Перминов В.П., Иохимович В.Л., Гирский В.Е. и др. Непрерывная разливка стали в заготовки крупного сечения. М.: Металлургия, 1970.

6. Гранат И.Я. Основные факторы, определяющие технологию непрерывной разливки стали со скольжением корки // Непрерывная разливка стали: Тр. первого Всесоюз. совещ. по непрерывной разливке. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 145–155.

7. Рудой Л.С., Майоров Н.П., Кушнарев И.Т. Контакт слитка со стенками кристаллизатора // Сталь. 1966. № 12. С. 1093–1095.

8. Рудой Л.С., Баптизманский В.И. Производительность машин непрерывного литья заготовок. Киев: Техника, 1982.

9. Сладкошteeв В.Т., Потанин Р.В., Суладзе О.Н., Рутес В.С. Непрерывная разливка стали на радиальных установках. М.: Металлургия, 1974.

10. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И. Эффект прилипания твердой корочки к стенке кристаллизатора при непрерывном литье стали. Сообщение 1: Возникновение растягивающих напряжений на поверхности твердой корочки // Литье и металлургия. 2007. № 2. С. 48–55.

11. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И. Эффект прилипания твердой корочки к стенке кристаллизатора при непрерывном литье стали. Сообщение 2: Влияние режима качения кристаллизатора // Литье и металлургия. 2007. № 2. С. 56–60.

12. Мартынов О.В., Криштал М.А., Козин В.Е. и др. Температурные измерения в процессе непрерывной разливки стали // Непрерывная разливка стали / Под ред. О.В. Мартынова. М.: Металлургия, 1970. С. 59–79.

13. Козин В.Е., Мартынов О.В., Криштал М.А. О теплообмене в зоне вторичного охлаждения при непрерывной разливке // Сталь. 1971. № 3. С. 226–228.

14. Хаммер Р., Бехер Г., Динер А. и др. Технологические мероприятия по улучшению качества поверхности непрерывнолитых слябов // Черные металлы (пер. с нем.). 1989. № 6. С. 11–19.

15. Якобше Р.Я., Наконечный Н.Ф., Лыба А.П. и др. Особенности деформации и разрушения медных плит ребристых кристаллизаторов УНРС в процессе их эксплуатации // Проблемы стального слитка. Т. 4. М.: Металлургия, 1969. С. 594–595.

16. Лейтес А.В. Защита стали в процессе непрерывной разливки. М.: Металлургия, 1984.

17. Дюдкин Д.А., Маняк Н.А., Левин П.А., Шукстальский И.Б. Условия формирования корки непрерывного слитка // Сталь. 1987. № 9. С. 43–45.

18. Левин П.А. Исследование процесса формирования поверхности непрерывного слитка при взаимодействии с подвижным кристаллизатором // Изв. вузов. Черная металлургия. 1990. № 6. С. 17–20.

19. Шпайт К.Г., Бунгерот А. Непрерывная разливка стали с кристаллизатором, предотвращающим образование трещин в заготовке // Черные металлы (пер. с нем.). 1964. № 21. С. 3–9.

20. Фультмахт В.В., Ткачев П.Н., Сливчанская В.В. Механизм образования паукообразных трещин на поверхности непрерывнолитых слябов // Сталь. 1973. № 9. С. 804–806.

21. Ефремов П.Е. К природе паукообразных трещин на непрерывных слитках // Проблемы стального слитка. Т. 7. М.: Металлургия, 1978. С. 204–208.

22. Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В., Поляков А.А. Избирательный перенос в узлах трения. М.: Транспорт, 1969.