



The comparison of temperatures, deformations and pressures for two chosen regimes of the crystallizer swinging, which have difference in duration of skin contact with crystallizer wall, is given in the present article.

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 2: ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА КАЧАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА

Разработка технологических мероприятий по устранению продольных трещин, возникающих на поверхности непрерывнолитых заготовок в пределах кристаллизатора, нуждается в теоретическом обосновании. В предыдущем сообщении [1] для объяснения возможности образования трещин в пределах кристаллизатора рассматривается явление прилипания твердой корочки литой заготовки к стенкам кристаллизатора, следствием чего служит возникновение растягивающих напряжений на охлаждаемой поверхности затвердевающей заготовки. Для подтверждения существования эффекта прилипания корочки заготовки к стенке кристаллизатора в работе [1] приводятся результаты экспериментов Л.С. Рудого [2], выполненных с использованием электроконтакторов, вмонтированных в стенку кристаллизатора. При этом следует заметить, что эксперименты Л.С. Рудого не являются единственным аргументом в пользу существования эффекта прилипания. Внешние проявления эффекта прилипания твердой корочки к стенке кристаллизатора были обнаружены при освоении процесса непрерывной разливки стали.

При литье стали в неподвижный кристаллизатор, выполненный из водоохлаждаемых медных плит, столкнулись с трудностью извлечения первичного литника из кристаллизатора вследствие приваривания твердой корочки к стенкам кристаллизатора. В связи с этим пришлось усложнить конструкцию кристаллизатора за счет придания ему возвратно-поступательного движения, которое в настоящее время является неотъемлемым атрибутом данного конструктивного блока МНЛЗ. Основными показателями режима возвратно-поступательного движения кристаллизатора являются

амплитуда и частота колебаний, выбор которых в существенной мере определяет качество поверхности получаемой непрерывнолитой заготовки [3–8]. Однако и при движении кристаллизатора относительно твердой корочки слитка на поверхности получаемых литых заготовок обнаруживаются следы частичного приваривания (прилипания) корочки в виде задиров, локальных надрывов либо разветвленных паукообразных трещин, которые лишь частично завариваются при последующей прокатке заготовок.

Причина возникновения указанных дефектов на поверхности заготовки состоит в том, что каждый полный цикл движения кристаллизатора неизбежно включает два периода:

1) перемещение кристаллизатора в направлении вытягивания заготовки (вниз для МНЛЗ вертикального типа);

2) перемещение кристаллизатора в противоположном направлении (вверх), сопровождаемое отрывом медных стенок от твердой корочки.

При попутном движении кристаллизатора и твердой корочки скорость движения кристаллизатора может быть равна скорости вытягивания заготовки либо несколько превышать ее, когда кристаллизатор движется с опережением вытягиваемой заготовки. В первом случае твердая корочка находится некоторое время в контакте со стенкой кристаллизатора и следует ожидать проявлений эффекта прилипания. Во втором случае при движении кристаллизатора с опережением происходит осаивание твердой корочки, что приводит к образованию поперечных складок на поверхности заготовки.

Таким образом, длительность контакта твердой корочки со стенкой кристаллизатора, определяю-

щая вероятность прилипания корочки к стенке, становится одним из важных технологических параметров, влияющих на качество поверхности заготовки. Проиллюстрируем высказанные выше соображения о режиме качания кристаллизатора на конкретном примере. На рис. 1 приведены результаты измерения усилий отрыва кристаллизатора от заготовки (стального сляба поперечным сечением 900x180 мм), отливаемой на МНЛЗ радиального типа, в сопоставлении с перемещением и скоростью движения кристаллизатора по данным [4, с. 276–278]. На рис. 1, а участок 1–2 перемещений кристаллизатора соответствует подъему кристаллизатора вверх с некоторой постоянной скоростью (около 2,2 м /мин); при этом усилия вытягивания, как показано на рисунке, испытывают колебания в пределах 22–38 кН.

На участке 2–3 перемещений скорость движения кристаллизатора существенно различна для двух этапов: на первом этапе (при фиксации растягивающих усилий) наблюдается колебание скорости движения кристаллизатора вокруг некоторого среднего значения, равного скорости вытягивания заготовки (рис. 1, б); на втором этапе (при наличии сжимающих усилий) скорость движения кристаллизатора несколько опережает скорость вытягивания заготовки.

Таким образом, в данном случае в течение полного периода циклического движения кристаллизатора (длительность полного периода составляет 2 с) определенный период времени (0,6 с) кристаллизатор двигался со скоростью, равной скорости вытягивания заготовки, что является предпосылкой возможности осуществления локального прилипания твердой корочки к стенке кристаллизатора.

Необходимо отметить, что определение рациональных режимов качания кристаллизатора длительное время опиралось на эмпирические данные производственных наблюдений и поиск соответствующих конструктивных решений относительно механизма движения кристаллизатора по заданному режиму. В связи с этим следует отметить важность публикации [9], в которой обращалось внимание на необходимость учета деформаций и напряжений в твердой корочке непрерывнолитой заготовки при определении рациональных режимов качания кристаллизатора.

В настоящей работе решение данной задачи осуществляется на базе совместного решения уравнений нелинейной термоупругости и нестационарной теплопроводности для элемента твердой корочки, примыкающей к стенке кристаллизатора (рис. 2).

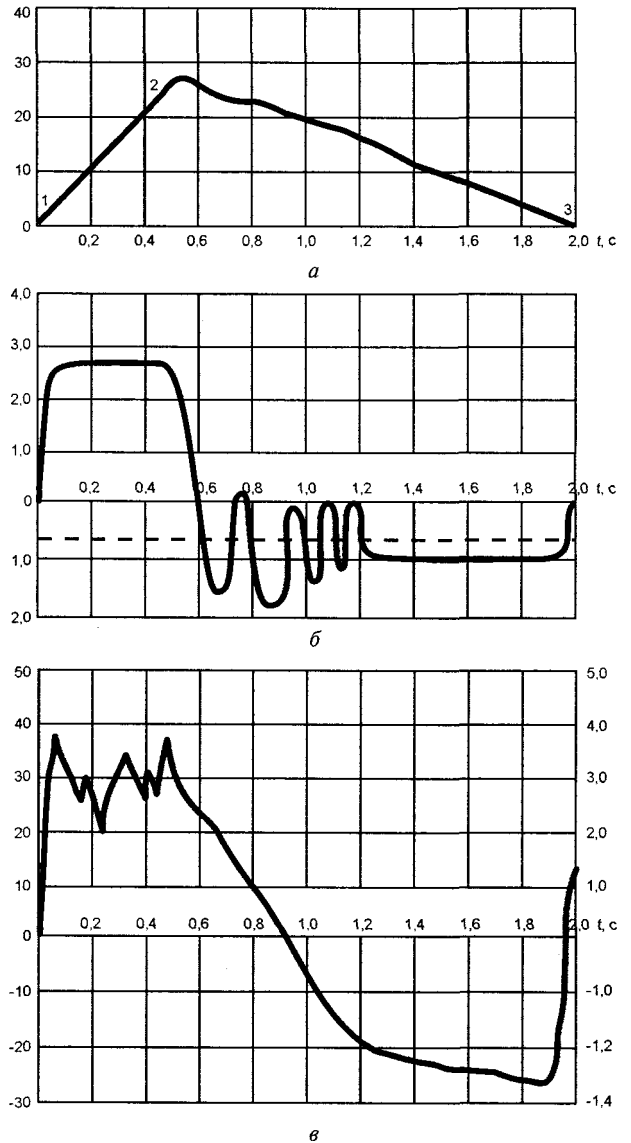


Рис. 1. Изменение перемещений (а), скорости движения кристаллизатора (б) и усилий вытягивания слитка из кристаллизатора (в) при непрерывном литье стального сляба на МНЛЗ Руставского металлургического завода [4]

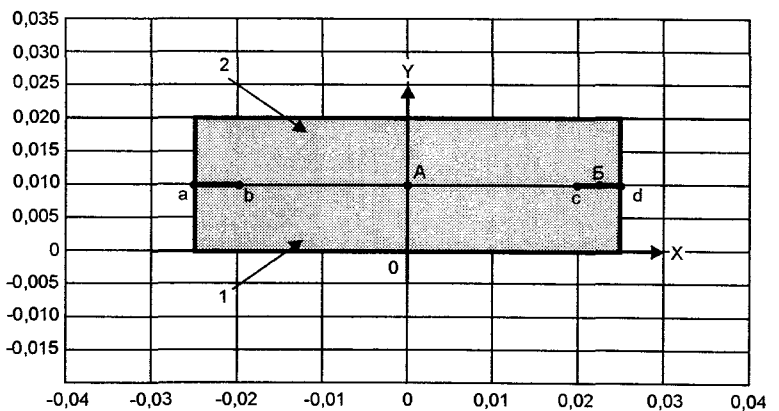


Рис. 2. Схема расчетного элемента твердой корочки слитка (1) и стенки кристаллизатора (2); ab и cd – участки прилипания, А и Б – контрольные точки для построения графиков

В отличие от известных решений задачи термоупругости для затвердевающих отливок простейшей формы (плиты, цилиндра) в квазистационарной постановке [10–12] в данном случае используются динамические уравнения в перемещениях (уравнения Ламе), включающие вторую производную от перемещений по времени. Математическая формулировка задачи приведена в сообщении 1 [1].

Решение уравнения теплопроводности для расчетного элемента размерами $X=0,025$ м, $Y=0,01$ м выполняется при задании следующих граничных условий:

при $Y=0,01$ м

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = H(t)(T_{\text{пов}} - T) + \sigma_b(t)(T_{\text{пов}}^4 - T^4), \quad (1)$$

где $H(t)$ - коэффициент контактного теплообмена на участках прилипания ab и cd ; $\sigma_b(t)$ - приведенный коэффициент теплообмена излучением в зазоре между твердой корочкой и стенкой кристаллизатора;

при $Y=0$

$$T = T_0 = 1773 \text{ К}; \quad (2)$$

при $X=\pm 0,025$ м

$$\frac{\partial T}{\partial X} = 0. \quad (3)$$

Начальное условие:

при $t=0$

$$T = T_0. \quad (4)$$

При задании коэффициентов теплоотдачи $\alpha(t)$ и $\sigma_b(t)$ принимается во внимание режим качания кристаллизатора путем задания частоты качаний f (Гц) и длительности интервалов времени, в течение которых возможно прилипание корочки к стенке кристаллизатора. В ходе расчетов сопоставили два режима качания, различающихся длительностью указанных интервалов времени и отраженные графиками изменения во времени функций $\alpha(t)$ и $\sigma_b(t)$ (рис. 3, 4).

Как следует из рис. 3, 4, периодичность качания определяется величиной $\Delta t=0,5$ с, что соответ-

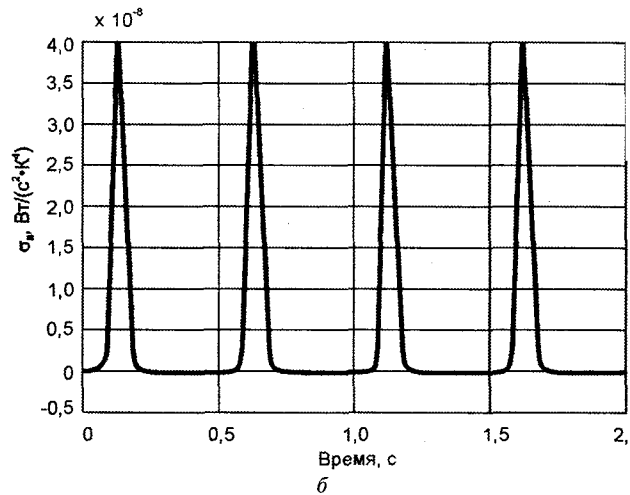
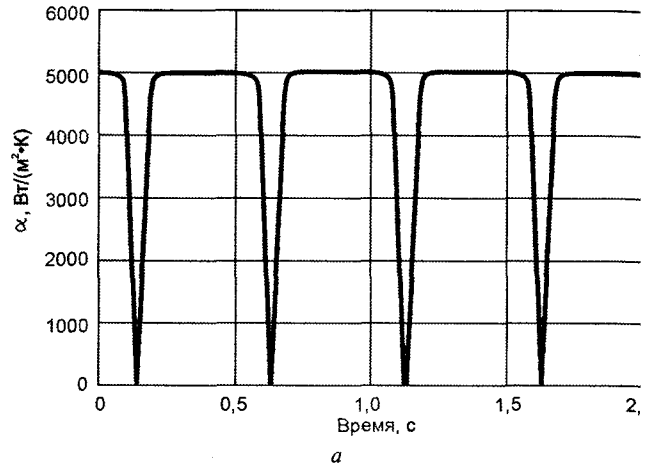


Рис. 3. Изменение коэффициента теплоотдачи α (а) и приведенного коэффициента теплообмена излучением σ_b (б) для схемы режима "долгого контактирования"

ствует частоте качаний $f=2$ Гц, а значения коэффициентов теплоотдачи $\alpha(t)$ и $\sigma_b(t)$ приняты равными $5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и $4 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, соответственно с учетом эмпирических данных по контактному теплообмену [13]. Протяженность участков прилипания ab и cd принята равной 1 мм.

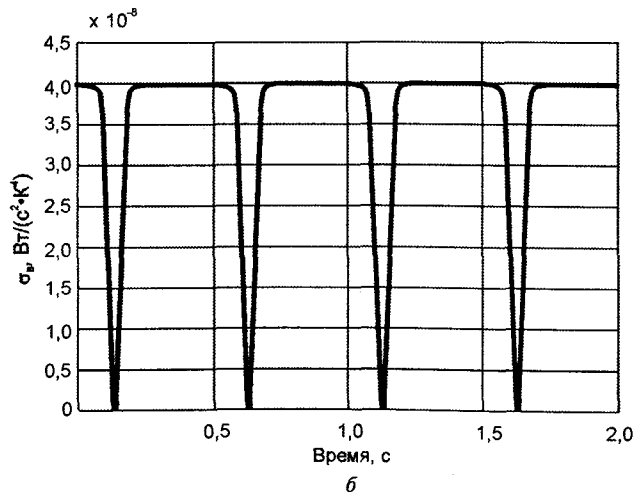
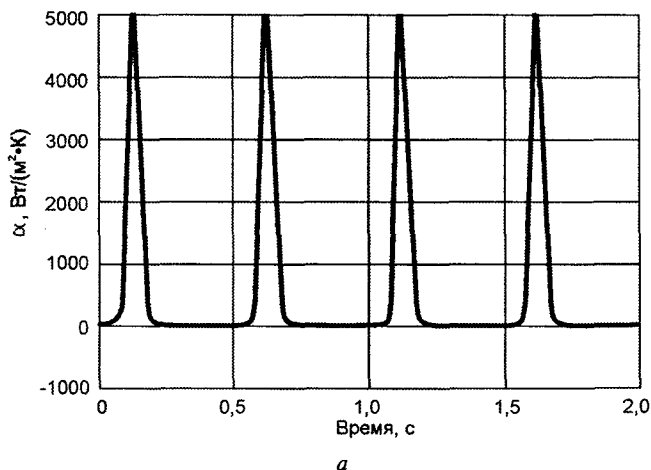


Рис. 4. Изменение коэффициента теплоотдачи α (а) и приведенного коэффициента теплообмена излучением σ_b (б) для схемы режима "краткого контактирования"

Из рис. 3, 4 следует, что принятые для сопоставления режимы качания существенно различаются длительностью непосредственного примыкания твердой корочки к стенке кристаллизатора, так что ориентировочно соблюдаются соотношения:

$$(\Delta t)_{\text{долг}} \cong \frac{3}{4} \Delta t \quad \text{— для режима "долгого контакта";}$$

$$(\Delta t)_{\text{крат}} \cong \frac{1}{4} \Delta t \quad \text{— для режима "краткого контакта",}$$

где $\Delta t = 1/f = 0,5$ с.

Использование уравнений Ламе позволяет учесть динамические эффекты колебательного гипа, сопровождающие деформирование твердой корочки заготовки при возвратно-поступательном движении кристаллизатора.

Отметим, что пример решения такой задачи в упрощенной постановке приводится в сообщении [1], цель которой состояла в том, чтобы показать принципиальную возможность возникновения растягивающих напряжений на поверхности твердой корочки. Цель настоящей работы — сопоставление температур, деформаций и напряжений для двух выбранных режимов качания кристаллизатора, различающихся длительностью непосредственного кон-

такта корочки со стенкой кристаллизатора. В качестве представительной точки для указанного сопоставления выбрана точка A с координатами $X=0$, $Y=0,01$ м (см. схему расчетного элемента на рис. 2).

Решение сопряженной задачи нелинейной термоупругости и нестационарной теплопроводности проведено методом конечных элементов при выборе расчетного шага по времени $\Delta t=0,01$ с.

Значения теплофизических и механических характеристик материала (углеродистой стали) приведены в сообщении [1], результаты расчетов — на рис. 5–7. В частности, на рис. 5 показано изменение во времени температуры в наиболее характерных точках охлаждаемой поверхности A (1) и B (2) для режимов "долгого" (а) и "краткого" (б) контактирования на участках прилипания ab и cd .

На рис. 6, 7 показано изменение во времени деформаций ϵ_x и напряжений σ_x в точке A для "долгого" и "краткого" режимов контактирования.

Прежде всего следует отметить, что амплитудные значения деформаций и напряжений устанавливаются достаточно быстро: для деформаций — через 3–4 цикла качания, для напряжений — через 2–3 цикла.

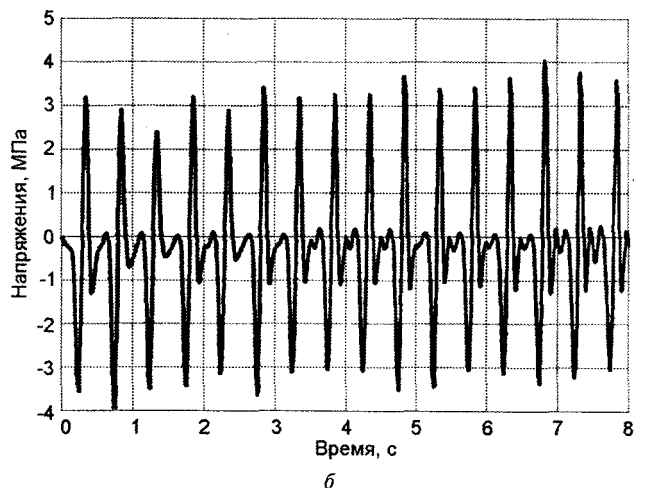
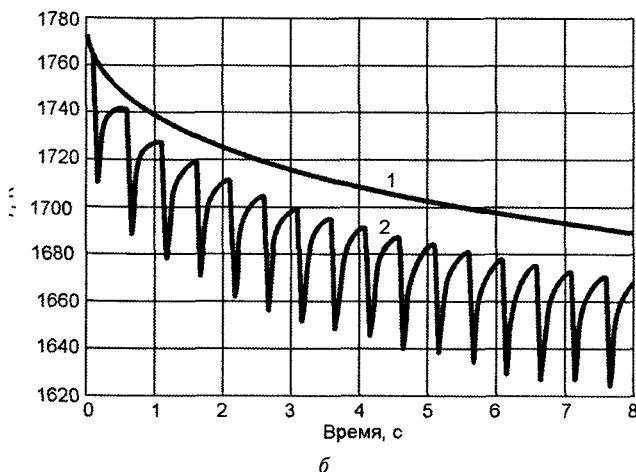
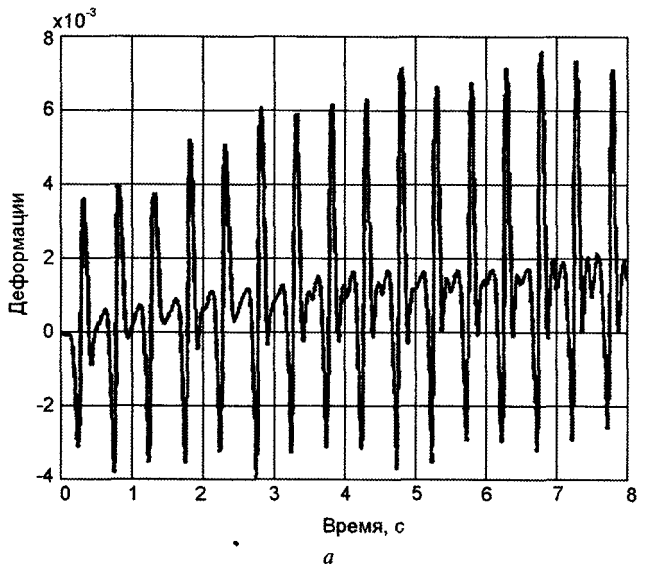
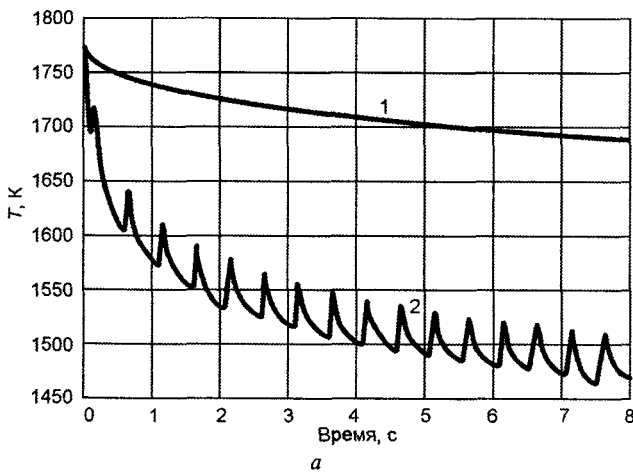


Рис. 5. Изменение во времени температуры в контрольных точках A и B твердой корочки для "долгого" (а) и "краткого" (б) режимов контактирования

Рис. 6. Изменение деформации ϵ_x (а) и напряжения σ_x (б) во времени для "долгого" режима контактирования (точка A)

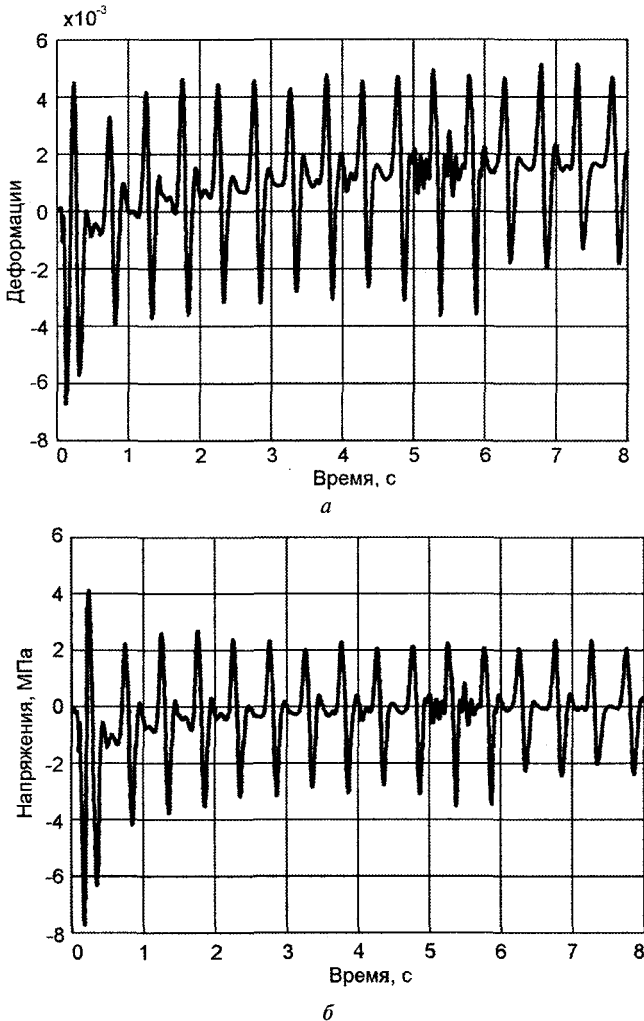


Рис. 7. Изменение деформации ϵ_x (а) и напряжения σ_x (б) во времени для "краткого" режима контактирования (точка А)

Это наблюдение дает основания считать принятое общее число циклов качания достаточным для фиксирования установившихся амплитудных значений ϵ_x и σ_x . Далее, как видно из рисунков, внутри каждого цикла изменения указанных параметров совершаются с периодами 0,1-0,2 с, что на порядок превышает принятое значение расчетного интервала времени (0,01 с) и свидетельствует о достаточно высокой точности расчетов. Для стадии установившихся колебательных режимов изменения деформаций и напряжений, т.е. при $t > 4-5$ с, амплитудные значения деформаций и напряжений составляют:

$\bar{\epsilon}_x = 6,6 \cdot 10^{-3}$, $\bar{\sigma}_x = 3,5$ МПа — для режима "долгого контакта",

$\bar{\epsilon}_x = 4,9 \cdot 10^{-3}$, $\bar{\sigma}_x = 2,0$ МПа — для режима "краткого контакта".

Таким образом, средние амплитудные значения напряжений при "кратком контакте" на 65-75% меньше, чем при "долгом контакте". Этот

вывод полностью согласуется с производственными данными [14, 15], полученными при сокращении до минимума длительности контактирования твердой корочки со стенкой кристаллизатора.

В заключение следует отметить, что, согласно расчетам, изменение деформаций ϵ_x и напряжений σ_x протекает в режиме знакопеременных колебаний, что способствует возникновению трещин усталостного типа. Вместе с тем за время пребывания корочки в пределах кристаллизатора число циклов, обусловленное качанием кристаллизатора, сравнительно невелико (несколько сот циклов), в связи с чем анализ сохранения сплошности твердой корочки в пределах кристаллизатора нуждается в использовании идейного и математического аппарата теории "малоциклового усталости".

Литература

1. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Кабишов С.М. 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.
2. Рудой Л.С., Майоров Н.П., Кушнарев И.Т. Контакт слитка со стенками кристаллизатора // *Сталь*. 1966. № 12. С. 1093–1095.
3. Кобелев В.А. Условия применимости синусоидального закона качания кристаллизатора // *Сталь*. 1967. № 6. С. 503–506.
4. Энергосиловые параметры установок непрерывной разливки стали / М.Я. Бровман, Е.В. Сурин, В.Г. Грузин и др. М.: Металлургия, 1969.
5. Исследование прочности слитка при его формировании в кристаллизаторе МНЛЗ / В.М. Шусторович, В.С. Патрикеев, А.М. Энгоян и др. // *Сталь*. 1979. № 9. С. 670–673.
6. Выбор параметров качания кристаллизатора УНРС / В.Г. Грузин, Б.Г. Кузнецов, Н.Д. Громов и др. // *Сталь*. 1971. № 9. С. 803–804.
7. Лебедев В.И., Евтеев Д.П. Оптимальные параметры синусоидального закона возвратно-поступательного движения кристаллизатора // *Сталь*. 1973. №4. С. 315–317.
8. Энгоян А.М. Определение оптимальной частоты качания кристаллизатора // *Сталь*. 1982. № 10. С. 25–26.
9. Мачикин В.И., Ефименко С.П., Левин П.А., Кондратюк А.М. Определение параметров качания кристаллизатора МНЛЗ с учетом деформации отливаемой заготовки // *Сталь*. 1985. № 4. С. 22–24.
10. Пальмов В.А. О напряжениях, возникающих при затвердевании материалов // *Механика твердого тела*. 1967. № 4. С. 80–85.
11. Левин М.А. Определение напряжений в затвердевающей отливке. *Прикладная механика*. 1968. Т. 5. Вып. 9. С. 76–82.
12. Журавлев В.А., Китаев Е.М. *Теплофизика формирования непрерывного слитка*. М.: Металлургия, 1974.
13. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. *Контактное термическое сопротивление*. М.: Энергия, 1977.
14. Каваками К., Ямага М., Утида Ф. *Металлургические проблемы, направленные на обеспечение возможности прокатки с одного нагрева непрерывнолитых слэбов* // *Черные металлы* (пер. с нем.). 1988. № 23. С. 3–7.
15. Эренберг Х.-Ю., Кайзер Х.-П., Клуге Е., Вюнненберг К. *Практические результаты литья круглых слитков через резонансный кристаллизатор* // *Черные металлы* (пер. с нем.). 2000. № 3. С. 34–39.