

Таким образом, исследована динамика изменения содержания водорода в металле по ходу выпечной обработки стали. Определены коэффициенты регрессии в уравнении дегазации стали на установках RH и VD, позволяющие рассчитывать длительность вакуумной обработки металла для достижения заданных значений содержания водорода в металле. Установлены пороговые значения содержания водорода перед началом разливки для углеродистых и легированных марок сталей, при превышении которых резко возрастает вероятность появления брака при ультразвуковом контроле готового проката.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кнюпель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. М.: Metallurgia, 1984. – 416 с.
2. Шаповалов В. И., Трофименко В. В. Флюксы и контроль водорода в стали. – М.: Metallurgia, 1987. – 160 с.
3. Лузгин В. П., Явойский В. И. Газы в стали и качество металла. – М.: Metallurgia, 1983. – 230 с.
4. Морозов А. Н. Водород и азот в стали. – М.: Metallurgia, 1968. – 284 с.
5. Понель С. И., Сотников А. И., Бороненков В. Н. Теория металлургических процессов. – М.: Metallurgia, 1986. – 464 с.

УДК 669.046

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук (НАН Беларуси),
Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, д-р техн. наук (НИИ «Плазан»)

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ДОПУСТИМОЙ СКОРОСТИ НАГРЕВА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ (НА ПРИМЕРЕ СЛИТКОВ СТАЛИ P18)

Быстрорежущая сталь P18 является одной из наиболее твердых и хрупких сталей, в связи с чем нагрев слитков и заготовок данной марки стали ведется с большими предосторожностями. Исследованиями Е. А. Клаустинга [1] показано, что для отожженных слитков стали ЭР (близкой по составу к стали P18) массой 200 кг безопасная по условиям сохранения сплошности металла температура печи при посадке слитков равна 1150 °С. Вместе с тем при посадке в печь сы-

рых (неотожженных) слитков стали ЭР безопасной является температура печи, равная 850 °С (для слитков массой 200 кг, средним диаметром 230 мм) и 650 °С (для слитков массой 300 кг, диаметром 280 мм). Таким образом, в опытах Е. А. Клаустинга показано, что допустимая температура печи при посадке неотожженных слитков заметно уменьшается с увеличением массы и среднего диаметра слитков стали ЭР.

Проблема определения допустимой (по условиям сохранения сплошности металла) скорости нагрева неотожженных слитков стали Р18 приобрела актуальность на Челябинском металлургическом заводе в связи с освоением режимов нагрева в методических печах слитков массой 610 кг, средним диаметром 320–330 мм.

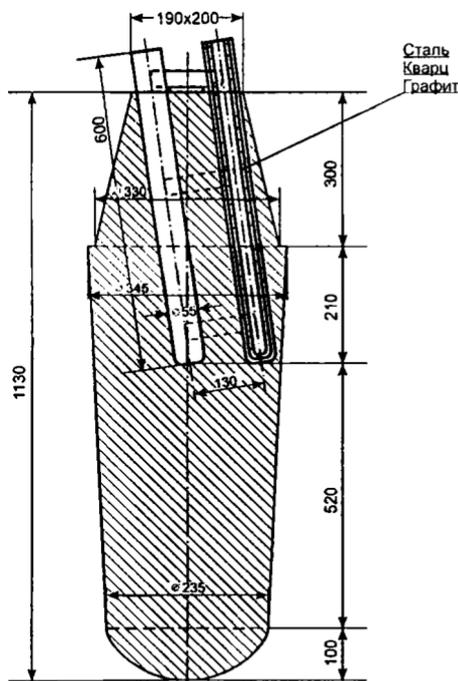


Рис. 1. Схема расположения защитных труб для термомпар, используемых при изучении температур в слитке стали Р18 при его охлаждении и нагреве

Ниже в краткой форме изложены результаты экспериментальных и расчетных работ, посвященных решению указанной проблемы.

К числу важнейших показателей температурного режима стального слитка в процессах его охлаждения и нагрева относятся изменение во времени температур на оси и поверхности слитка, а также максимальная разность температур вдоль радиуса слитка. Для введения термомпар в нагреваемый слиток создавали цилиндрические каналы в теле слитка путем вмораживания глухонных графитных трубок в тело слитка на стадии затвердевания, как показано на рис. 1. Учитывая возможность частичного растворения углерода в жидкой стали, графитовые трубки

размещали в глухонные кварцевые стаканы, причем нижние концы трубок ориентировали таким образом, чтобы горячие спаян термопар, размещенные в отверстиях, образованных трубками, попали на линию продольной оси слитка и вблизи от его поверхности.

Защитные чехлы (трубки) вводили в полость изложницы перед началом разливки, причем для необходимой (наклонной) ориентации чехлы помещали в стальные стаканы, которые путем сварки крепились к арматуре прибыльной надставки.

Создание отверстий в теле слитка указанным выше способом позволило избежать весьма трудоемкой операции высверливания отверстий в стали марки P18, отличающейся весьма высокой твердостью. Кроме того, наличие защитных чехлов позволило выполнить измерение температур

в двух указанных точках слитка в процессе затвердевания и последующего охлаждения, что представляет интерес для теории затвердевания расплава. При проведении экспериментов использовали платино-платинородиевые термопары, фиксация показаний термопар осуществлялась с применением электронных потенциометров типа ЭПП-09.

На рис. 2 представлены результаты измерений температуры на оси (T_0) и вблизи от поверхности слитка (T_1), а также непосредственно температуры поверхности ($T_{поверх}$), найденной путем интерполяции, и максимальной разности температур вдоль радиуса

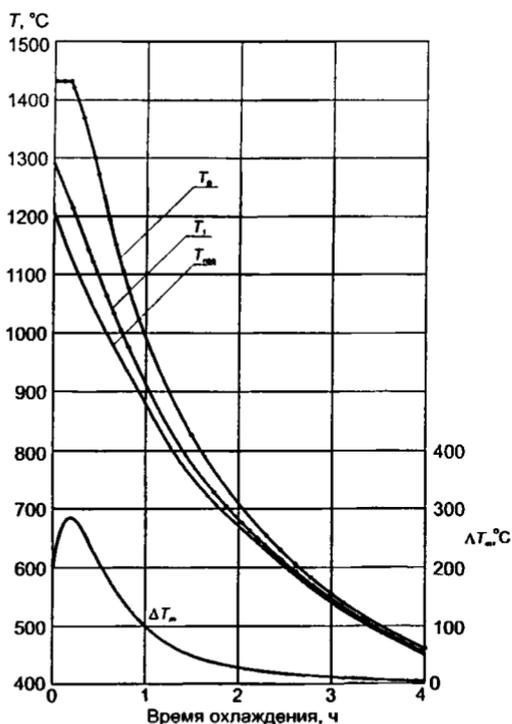


Рис. 2. Изменение температур в слитке стали P18 при его охлаждении в изложнице после разливки

слитка ($\Delta T = T_0 - T_{\text{пов}}$). Начало отсчета шкалы времени на рис. 2 принято в момент $t = 15$ мин, соответствующий моменту полного снятия начального перегрева расплава, заполняющего изложницу при разливке.

Видно, что максимальная разность температур по радиусу слитка в процессе его затвердевания достигается в момент времени $t = 35$ мин, что, по-видимому, соответствует полной длительности затвердевания слитка на данном его горизонте.

После завершения процесса остывания слитка защитные (кварцграфитовые) чехлы извлекались из тела слитка и полученные отверстия использовались для проведения измерений температуры в ходе нагрева холодных неотожженных слитков в процессе их нагрева в специальной камерной печи, разогретой к моменту посадки слитков до заданной температуры. На данной стадии исследований использовали хромель-алюмелевые термопары, отличающиеся достаточно высокими значениями термоэдс в интервале температур от 50 до 1300 °С.

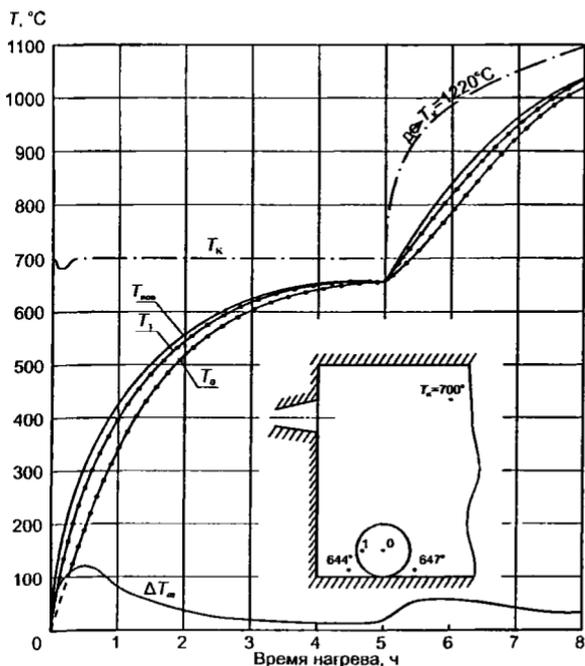


Рис. 3. Результаты измерения температуры в слитке при его нагреве в камерной печи ($T_{\text{печ}} = 700$ °С)

В ходе серии опытов значение начальной температуры печи перед посадом холодных неотожженных слитков стали P18 принимали равной 700, 900, 1000 и 1080 °С.

На рис. 3 и 4 представлены результаты измерений температуры в двух характерных точках, а также изменений температуры греющих газов в верхней части камерной печи и в непосредственной близости от нагреваемого слитка для двух первых, указанных выше температур печи. Видно, что с повышением температуры печи от 700 до 900 °С максимальная разность температур вдоль радиуса слитка возрастает от 115 до 200° градусов, причем никаких признаков нарушений сплошности металла в данных опытах не наблюдали.

Лишь при задании начальной температуры печи, равной 1000 и 1080 °С, зафиксировали разрушение слитка под действием термических напряжений. При этом максимальная разность температур ΔT вдоль радиуса слитка составила, как видно из рис. 5, 350°.

Таким образом, чисто эмпирическим путем установлено, что разность температур по радиусу слитка стали P18 диаметром 330–340 мм (массой 610 кг), соответствующая критической скорости нагрева при которой становится возможным растрескивание слитков, составляет 330–350°.

На рис. 6 представлены фотографии извлеченных из печи обломков слитка, разрушенного под действием термических напряжений. Из исследования этих обломков можно сделать три заключения. Во-первых, разрушение слитка произошло под воздействием напряже-

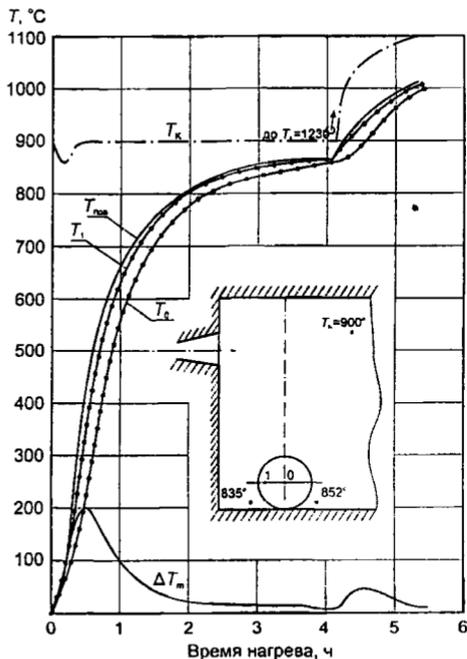


Рис. 4. Результаты измерения температур в слитке при его нагреве в камерной печи ($T_{\text{печ}} = 900^\circ\text{C}$)

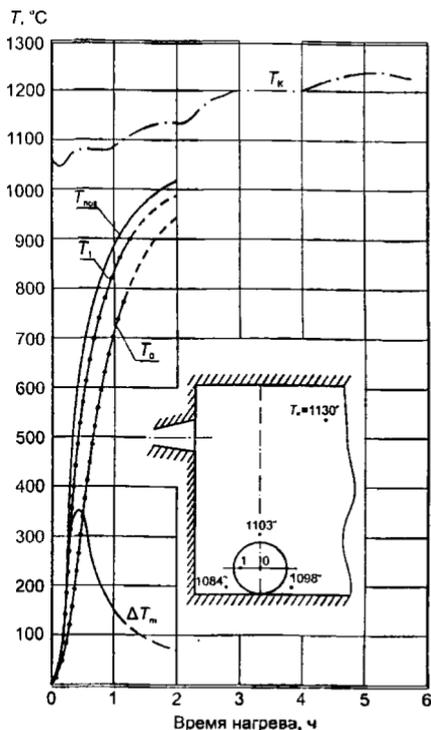


Рис. 5. Результаты измерения температуры в слитке при его нагреве в камерной печи ($T_{\text{печ}} = 1080^\circ\text{C}$)

бенности поля (периодическое образование узлов растягивающих напряжений вдоль продольной оси слитка).

К сожалению, современное состояние теории термических напряжений, возникающих при нагреве стальных слитков в пламенных печах при нагреве под прокатку, не позволяет решать столь сложные задачи нелинейной теории нестационарной термоупругости.

Современные теоретические основы технологии нагрева стали в печах, базирующиеся на трудах А. А. Померанцева, Г. П. Иванцова, В. И. Баптизманского, в наиболее завершенном виде представлены в книге Н. Ю. Тайца [2], опубликованной полвека назад.

В основе предложенных методов расчета термических напряжений [2] лежит использование интегралов линейной теории термоупру-

ний, действующих вдоль продольной оси слитка. Во-вторых, излом металла на поверхности разрушения отличается чистотой, отсутствием грубых зерен, что позволяет сделать заключение о хрупком характере излома. Наконец, в-третьих, слиток разрушился на четыре примерно равных по массе элемента, что позволяет предположить наличие как минимум трех узлов максимальных растягивающих продольных напряжений по длине слитка.

Последнее наблюдение совершенно определенным образом свидетельствует о необходимости изучения объемного трехмерного поля термических напряжений в слитке, подвергаемом термическому воздействию, поскольку только при изучении трехмерного поля напряжений представляется возможным выявить указанные особен-

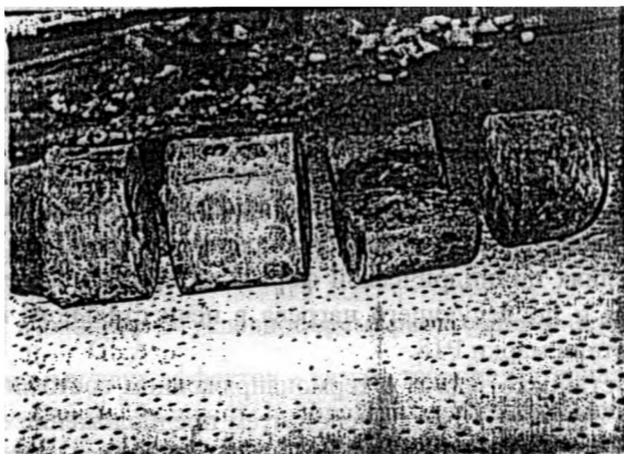


Рис. 6. Внешний вид слитка, разрушенного при посадке в печь с температурой $1080\text{ }^{\circ}\text{C}$

гости для тел простейшей формы—пластины и цилиндра неограниченной протяженности, полученных при допущении о неизменности физических свойств стали в процессе нагрева изделий в печи. Кроме того, определение температурного поля изделий при их нагреве в печи выполнено в предположении неизменной температуры греющей среды (T_S) и коэффициента теплообмена (α_k) на внешней поверхности изделий [2].

Указанные предположения позволяют при вычислении интегралов линейной теории термоупругости использовать известные решения теории нестационарной теплопроводности при задании граничных условий третьего рода на внешней поверхности нагреваемых изделий простой формы [3] и получать весьма простые в практическом применении графики для расчетной оценки допускаемой скорости нагрева изделий. Отмечая несомненную заслугу Н. Ю. Тайца в развитии теории термических напряжений в нагреваемых изделиях, нельзя не отметить, что простота полученных им решений получается за счет очевидных и серьезных упрощений в постановке задач теплопроводности и термоупругости. В этом смысле можно утверждать, что трудами Н. Ю. Тайца в данной области завершается опре-

деленный этап в обосновании рациональных технологических режимов тепловой обработки стальных изделий.

Следующий этап в развитии технологии нагрева стали связан с широким использованием во второй половине XX в. численных методов и цифровых ЭВМ (компьютеров) при решении практических задач по определению рациональных режимов тепловой обработки стальных изделий. В качестве примера открывающихся при этом возможностей ниже приводится расчет термических напряжений в изделиях цилиндрической формы на стадиях затвердевания, охлаждения и последующего нагрева в печи стального изделия – слитка из стали марки Р18.

При постановке задачи о термонапряженном состоянии затвердевающего стального слитка используем предположение о том, что каждая компонента тензора деформаций составлена суммой упругой и вязкой частей:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^E + \varepsilon_{ij}^V \quad (i, j = 1, 2, 3),$$

где

$$l_{i,j}^E = \frac{1}{2G} S_{i,j}; \quad \dot{l}_{i,j}^V = \frac{1}{2\eta} S_{i,j}; \quad (1)$$

$l_{i,j} = \varepsilon_{i,j} - \varepsilon$, $S_{i,j} = \sigma_{i,j} - \sigma$, $\varepsilon = \frac{1}{3} \varepsilon_{i,j}$, $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{i,j}$ – компоненты девиаторов деформаций и напряжений; G – модуль сдвига; точка означает операцию дифференцирования по времени:

$$G' = \frac{dG}{dT}.$$

Дифференцируя первое уравнение (1) и складывая его со вторым, получаем систему уравнений, описывающих поведение материала:

$$2G\dot{l}_{ij} = \dot{S}_{ij} + \left(\frac{G}{\eta} - \frac{G'\dot{T}}{G} \right) S_{ij}, \quad (2)$$

где η – коэффициент вязкости материала.

В частности, для осесимметричной задачи о термических напряжениях в слитке цилиндрической формы система уравнений (2) примет вид

$$\left. \begin{aligned} 2G\dot{l}_r &= \dot{S}_r + \frac{1}{\tau_p} S_r, \\ 2G\dot{l}_\theta &= \dot{S}_\theta + \frac{1}{\tau_p} S_\theta, \\ 2G\dot{l}_z &= \dot{S}_z + \frac{1}{\tau_p} S_z. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь $\tau_p = \left(\frac{G}{\eta} - \frac{G'T}{G} \right)^{-1}$ – условное время релаксации материала, учитывающее сумму двух эффектов – вязкое течение материала под нагрузкой (ползучесть) и влияние нелинейного изменения модуля сдвига в зависимости от температуры; \dot{T} – локальная скорость охлаждения.

Помимо уравнений (3), постановка задачи включает уравнение равновесия

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (4)$$

и соотношения Коши, связывающие компоненты тензора деформаций с перемещением u :

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial \omega}{\partial z} = \text{const.} \quad (5)$$

Кроме того, используется предположение о том, что средние значения деформаций и напряжений (ε , σ) связаны между собой уравнением

$$\varepsilon = N\sigma + \alpha\delta T, \quad (6)$$

где $N = \frac{1-2\nu}{E}$ (ν – число Пуассона); δT – избыточная локальная температура.

Дополнительное условие плоской деформации в сечении слитка, перпендикулярном его продольной оси, формулируется в виде соотношения

$$2\pi \int_0^R \sigma_z r dr = 0, \quad (7)$$

позволяющего вычислить продольную деформацию $\varepsilon_z = \text{const}$, а затем и продольную компоненту тензора напряжений σ_z в зависимости от двух других компонент тензора напряжений: $\sigma_z = f(\sigma_r, \sigma_\theta)$.

Изложенная выше постановка задачи термовязкоупругости для тел цилиндрической формы предполагает известным нестационарное поле температур в твердой оболочке затвердевающего слитка, а после завершения процесса кристаллизации – в остывающем массиве сплошного слитка. Для определения температурного поля в стальном слитке на стадиях его затвердевания и последующего нагрева используется квазистационарная постановка задачи теплопроводности, при которой эффект выделения теплоты фазовых переходов в металле учитывается путем задания нелинейной зависимости удельной теплоемкости материала от температуры [4].

При постановке задачи теплопроводности граничные условия задаются с учетом конкретных условий теплообмена стального слитка: на первой стадии (затвердевание в изложнице) – теплообмена со стенкой чугунной изложницы через газовоздушный зазор; на второй стадии (нагрев слитка в печи) – теплообмена излучением и конвекцией с печной атмосферой при заданных условиях теплообмена излучением в рабочем пространстве печи.

Таким образом, постановка связанной задачи теплопроводности и термовязкоупругости предполагает учет целого набора нелинейностей как при задании граничных условий задачи теплопроводности (учет закона теплообмена Стефана–Больцмана), так и при учете зависимости физических свойств материала (коэффициентов теплопроводности, удельной теплоемкости, массовой плотности, модуля упругости, коэффициента вязкости, числа Пуассона) от температуры.

Решение поставленной таким образом задачи осуществляется численным методом и позволяет определить текущие во времени значения температур, деформаций и напряжений при заданных технологических параметрах (показатели слитка и изложницы, длительность выдержки слитка в изложнице, длительность пребывания на воздухе и нагрева слитка в печи), а также полученных эмпирическим путем физических свойств материала.

Конкретные примеры решения связанной задачи теплопроводности и термовязкоупругости для стальных изделий цилиндрической формы можно найти в публикациях [5–8].

Для слитка стали Р18 средним диаметром 340 мм решение поставленной выше задачи иллюстрируется графиками на рис. 7 и 8. Отметим, что теплофизические свойства стали Р18, использованные при проведении расчетов, принимались по данным Г. А. Хасина и Л. В. Дьяконовой [9]. В частности принято, что интервал кристаллизации стали Р18 ограничен температурами $T_{лик} = 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{сол} = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, начальная температура расплава, заполняющего изложницу при разливке, – $1470\text{ }^{\circ}\text{C}$, толщина стенки изложницы равна 170 мм, продолжительность выдержки слитка в изложнице составляет 5 ч, после чего слиток поступает в печь, где нагревается в течение 2 ч.

Как видно из рис. 8, при остывании слитка после разливки в течение 5 ч разность температур вдоль радиуса слитка уменьшается

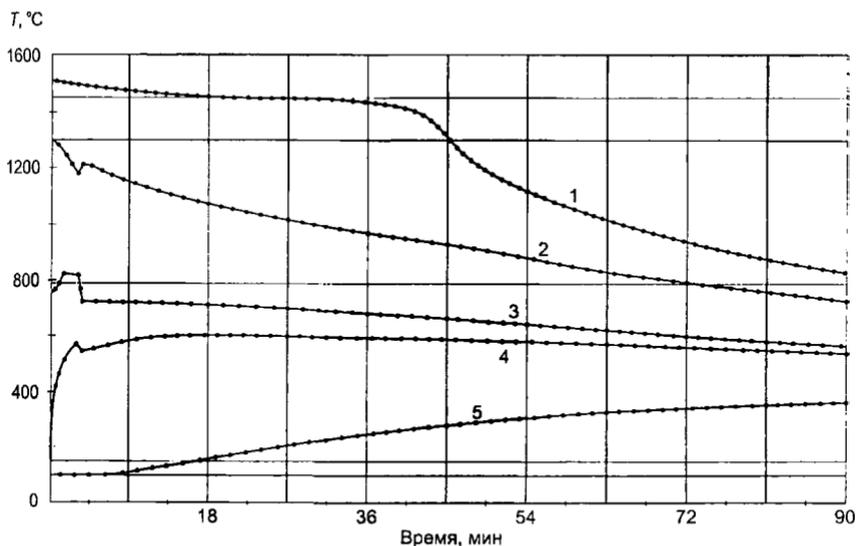


Рис. 7. Результаты расчетов по определению температур на оси (1) и поверхности (2) слитка стали Р18, а также на внутренней (4) и внешней (5) поверхностях стенки изложницы; 3 – температура в газозвдушном зазоре между слитком и стенкой изложницы

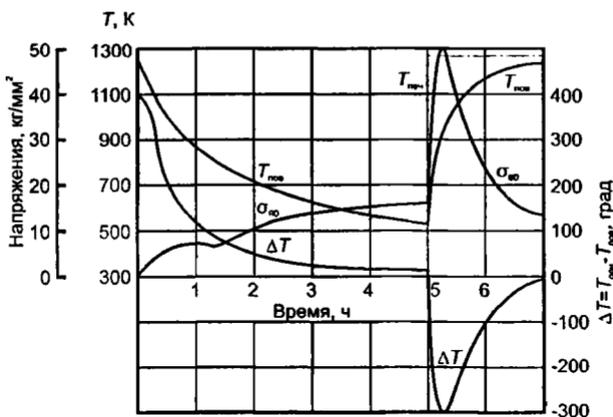


Рис. 8. Результаты расчетов по определению температур и термических напряжений в неотожженном слитке стали P18 диаметром 340 мм на стадиях охлаждения после разливки и последующего нагрева в камерной печи ($T_{печ} = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$): $T_{пов}$ – температура поверхности слитка; $\Delta T = T_{осн} - T_{пов}$ – разность температур вдоль радиуса слитка; $T_{печ}$ – температура печи (---); $\sigma_{\theta\theta}$ – кольцевые (тангенциальные) напряжения на оси слитка

с 400 до 15° , а кольцевые напряжения на оси слитка достигают значений 160 МПа. Согласно расчетам, на оси симметрии тел цилиндрической формы соблюдается следующее соотношение между значениями кольцевой и продольной компонент тензора напряжений:

$$\sigma_{z0} \cong 2\sigma_{\theta\theta}$$

в связи с чем можно считать, что величина остаточных растягивающих напряжений на оси слитка, остывающего в изложнице, составит 320 МПа.

При последующем нагреве слитка в печи наблюдается резкое увеличение растягивающих напряжений на оси слитка. Через 16 – 18 мин от начала нагрева кольцевые напряжения на оси достигают значений 520 МПа и $\sigma_{z0} = 1040$ МПа.

На основании проведенных экспериментов с нагревом сырых (неотожженных) слитков стали P18 следует, что при посадке сырого слитка в печь, разогретую до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, разрушение его произошло в течение первых 8 – 10 мин. Расчеты, результаты которых приведены на рис. 8, показывают, что максимальные продольные растягиваю-

шие напряжения в слитке при этом достигают значений 800–850 МПа. На этом основании можно сделать вывод, что область допустимых значений растягивающих напряжений для литой стали P18 ограничена значениями $\sigma_{\text{доп}} = 600\text{--}800$ МПа.

Этот вывод согласуется с данными Е. А. Клаустинга [1], полученными для слитков стали марки ЭР массой 200–300 кг. Если использовать простейшее соотношение для продольных напряжений на оси цилиндрических тел при их нагреве в печи с постоянной температурой [2]

$$\sigma_{z0} = \frac{\alpha E \Delta T_0}{2(1-\nu)},$$

где $\Delta T_0 = T_{\text{пов}} - T_{\text{осн}}$, то можно получить следующие значения максимальной разности температур по сечению слитка, обеспечивающие сохранение сплошности материала при нагреве: $\Delta T_0 = 300 - 320^\circ$ для отожженных и $\Delta T_0 = 150 - 160^\circ$ для неотожженных слитков стали P18 диаметром 330–340 мм.

Зная допускаемые значения максимальной разности температур по сечению слитков, можно определить и допускаемые значения скорости нагрева слитков $C_{\text{доп}} = \frac{dT_{\text{пов}}}{dt}$ с использованием упомянутых выше графиков Н. Ю. Тайца [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Клаустинг Е. А. Опыт расчета допустимой скорости методического нагрева слитков // *Металлургия*. – 1938. – № 2 (98). – С. 50–61.
2. Тайц Н. Ю. *Технология нагрева стали*. 2-е изд. – М.: *Металлургиздат*, 1962. – 567 с.
3. Лыков А. В. *Теория теплопроводности*. – М.: *Высш. шк.*, 1967. – 600 с.
4. *Стальной слиток*. В 3 т. Т. 2. *Затвердевание и охлаждение* / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. А. Трусова, В. В. Филиппов; Под ред. В. И. Тимошпольского и Ю. А. Самойловича. – Минск: *Белорус. наука*, 2000.
5. Самойлович Ю. А., Ушакова Р. Г. Термические напряжения в стальном слитке, остывающем в изложнице // *Теплофизика и теплотехника в металлургии*: Сб. тр. ВНИИМТ. Свердловск: Средне-Урал. книж. изд-во, 1969. – № 19. – С. 199–211.
6. Анисович Г. А., Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. И., Хонова О. Г. Особенности контактного теплообмена в зазоре между слитком и изложницей при наличии шлакового гарниссажа // *Вести НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. – 2001. – № 4. – С. 132–137.

7. Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Маточкин В. А. Теоретические основы расчета температур, вязкоупругих напряжений и деформаций в корке непрерывнолитой заготовки // Энергетика: Изв. вузов и энергетических объединений СІПГ. – 2002. – № 3. – С. 48–56.

8. Расчет температур, напряжений и деформаций при производстве непрерывнолитых заготовок в условиях РУП «Белорусский металлургический завод» / Ю. А. Самойлович, В. И. Тимошпольский, В. В. Филиппов и др. // Металлургическая теплотехника: Сб. тр. – Днепропетровск, 2002. – Т. 7. – С. 104–109.

9. Хасин Г. А., Дьяконова Л. В. Теплофизические и электрические характеристики ряда легированных сталей и сплавов при высоких температурах // Проблемы стального слитка: Тр. 4-й конф. по слитку. – М.: Металлургиздат, 1969. – С. 71–85.

УДК 669.1.054.85

Д. Н. АНДРИАНОВ, канд. техн. наук (РУП «БМЗ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ИСХОДНОГО СЫРЬЯ НА КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ РУП «БЕЛОРУССКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»

Изучение влияния исходного сырья на качество готовой продукции имеет первостепенное значение для принятия обоснованных технических решений по совершенствованию технологии выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах.

В качестве металлического сырья в электросталеплавильном производстве в настоящее время используют стальной лом (углеродистый и легированный), чугуны (жидкий и твердый) и железо прямого получения (губчатое железо, горячебрикетированное железо, карбид железа, металлизированные окатыши). В зависимости от происхождения различают три основные категории стального лома:

образующийся при производстве стали (собственные ресурсы лома или оборотный лом);

образующийся при потреблении металлопроката (отходы металлообработки);

амортизационный (товарный) или основной.

Качество лома определяется в основном по трем параметрам. Первый параметр характеризует содержание железа в ломе; второй – содержание загрязняющих элементов, в первую очередь таких, как