

лей $\alpha = 0 - 15^\circ$ и заглублении защитной трубы $h_{\text{ст}} = 100 - 200$ мм по улавливанию примесных образований получены для частиц размером более 100 мкм. Наиболее эффективно конструктивное решение с применением наклонных щелей в полнопрофильных перегородках получено при углах наклона $5 - 10^\circ$.

Как видно из рис. 3, увеличение объема приемного отсека (относительно общего объема) трапецевидного промежуточного ковша до 30 %, образованного полнопрофильными перегородками, дает наилучшие результаты по снижению неметаллических включений в литом металле. В зависимости от дополнительных мер по повышению уровня расплава в промежуточном ковше и применения продувки, снижение неметаллических включений в литом металле в реальности наблюдалось в пределах 25 – 40 %.

На рис. 3 за единицу принят индекс снижения неметаллических включений при разливке жидкого металла через обычные промежуточные ковши без перечисленных технических решений.

Как показывают исследования, в промышленных и лабораторных условиях небольшой объем приемного отсека (менее 15 % для 27-т промежуточного ковша) оказывает влияние не только на распространение гидротоков в разливочных отсеках, но и на эмульсификацию поступающих в них шлаковых включений, всплытие которых с больших глубин затруднено. Источником эмульсификации шлакового покрова в стесненном приемном отсеке являются, как это было выявлено в ходе модельных испытаний, конусообразные вихри на мениске. Интенсивность и размеры последних зависят от скорости вхождения струи расплава в жидкую лунку и стесненности приемного пространства. Уменьшению эмульсификации, а следовательно и повышению чистоты расплава от включений способствуют применение «турбостоп», вдувание аргона через защитную трубу и донная продувка инертным газом.

Как показали исследования, степень очистки расплава от включений в промежуточных ковшах с полнопрофильными перегородками и без них при уве-

личении времени пребывания и размеров включений повышается.

Однако с увеличением времени пребывания расплава в ковше возрастают и перепады температур по длине ковша, что неблагоприятно сказывается на качестве заготовок, отливаемых через сливы у торцов промежуточных ковшей и стабильности их разливки.

Наличие в полнопрофильных перегородках перепускных отверстий площадью, соответствующей стабильному расходу расплава, расположенных под углом к горизонту, позволяет решить две проблемы: создать более благоприятную для всплытия неметаллических включений гидродинамику жидкой ванны и ускорить циркуляцию потоков, что снижает перепады температур расплава в разливочных отсеках.

Таким образом, перспектива применения полнопрофильных перегородок в промежуточных ковшах МНЛЗ очевидна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вишкарёв В.А. и др. Рафинирование стали в промежуточном ковше УНРС – М.: Информсталь, 1990. С. 18 – 48.
2. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали – М.: Мир, 2003. – 528 с.
3. Куклев А.В. и др. // Металлург. 2004. № 8. С. 43 – 45.
4. Гуцин В.Н., Ульянов В.А. Методы исследования и разработка градиентных промышленных технологий управления тепломассообменными процессами при разливке и формировании непрерывнолитых и стационарных заготовок. – Н. Новгород: НГТУ, 2006. – 141 с.
5. Ульянов В.А. и др. Внепечная обработка и разливка стали – Н.Новгород: НГТУ, 2008. – 129 с.
6. Кудрин В.А. Обработки стали на установках непрерывной разливки стали //Итоги науки и техники. Серия: производство чугуна и стали. Т. 20. – М.: ВИНТИ, 1990. С. 61 – 116.
7. Марченко И.К. Полунепрерывное литье стали. – М.: Металлургия, 1986. – 226 с.
8. Скворцов А.А., Акименко А.Д., Ульянов В.А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок – М.: Металлургия, 1991. – 216 с.

© 2012 г. В.А. Ульянов, В.Н. Гуцин, С.А. Балан
Поступила 23 мая 2012 г.

УДК 669.18:621.746.047.007

Ю.А. Самойлович

Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники

ФОРМИРОВАНИЕ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОЛОВКЕ РЕЛЬСОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Обеспечение безопасности движения поездов в значительной степени зависит от исправного содержания и стойкости железнодорожных рельсов. В настоящее время проблема повышения работоспособности желез-

нодорожных рельсов остается достаточно актуальной. Отказы рельсов, преждевременный выход которых связан с их недостаточным качеством, наносит существенный ущерб ОАО «Российские железные дороги».

На приобретение новых рельсов взамен выработавших свой ресурс ежегодно тратится около 10 млрд руб.

Вместе с тем, ознакомление с технической литературой по производству транспортного металла за рубежом показывает, что многие зарубежные фирмы производят рельсы, превосходящие отечественные по основным показателям стойкости и длительности эксплуатации в полтора – два раза.

Успехи зарубежных предприятий в производстве качественных рельсов во многом связаны с изменившимся подходом к выбору химического состава рельсовой стали и освоению новых технологических приемов термоупрочнения рельсов.

Заслуживает внимания, в частности, стремление к получению необходимой высокой твердости головки рельсов без увеличения содержания углерода, поскольку повышение углеродного эквивалента резко снижает свариваемость стали при монтаже и ремонте рельсовых путей.

В качестве примера успешной реализации такого подхода в работе [1] изложен опыт фирмы Тиссен Шталь (Германия) по производству рельсов повышенной прочности, основанный на использовании стали бейнитного класса, содержащей %: 0,35 – 0,40 C; 1,5 Si; 0,7 Mn; 1,1 Cr; 0,8 Mo и 0,1 V.

Изотермическая закалка рельсов указанного состава привела к формированию структуры мелкоигольчатого (нижнего) бейнита, обладающего твердостью около 400 HV и относительным удлинением порядка 9 %.

Дополнительный отпуск рельсов при 550 °C в течение 1 ч позволил достигнуть следующих показателей прочности и пластичности: временное сопротивление 1400 – 1450 Н/мм², относительное удлинение 13 – 15 %, твердость до 440 HV, вязкость разрушения не менее 40 МПа/м^{0,5}, что значительно превышает соответствующие показатели рельсов отечественного производства со структурой пластинчатого перлита [2].

Следует отметить, что проблема повышения конструкционной прочности изделий (в том числе и рельсов) из стали бейнитного класса является предметом обширных исследований в отечественной металлургической науке.

В работах [3 – 5] представлены результаты исследования механических свойств стали 30ХГСА и 40ХНМА, близких по составу к рельсовым сталям, при термоупрочнении по двум способам: при закалке в масле с последующим отпуском и при изотермической закалке в соляной ванне при температуре 325 °C в течение 15 – 30 мин. Показано, что временное сопротивление стали при обоих способах закалки достигает значений 140 – 160 кГ/мм², тогда как значения ударной вязкости при изотермической закалке в соль возрастают в 1,5 – 2 раза по сравнению со случаем закалки в масло.

К примеру, для стали 40ХНМА, содержащей, %: 0,40 C; 0,21 Mo; 0,72 Cr; 1,34 Ni, при закалке в масло с исходной температуры 850 °C временное сопро-

тивление равно $\sigma_B = 160$ кГ/мм², ударная вязкость $a_K = 2$ кГм/см² (отпуск после закалки при температуре 300 °C в течение двух часов).

В случае изотермической закалки в соль при $T = 325$ °C с выдержкой в течение 30 мин ударная вязкость металла достигает значений 3,4 кГм/см² при $\sigma_B = 165$ кГ/мм².

Промышленные эксперименты, результаты которых представлены в работах [6,7], подтвердили возможность повышения прочности железнодорожных рельсов до уровня $\sigma_B = 140 – 150$ кГ/мм² при высоких показателях пластичности металла. При этом упрочнение рельсов осуществлено путем изотермической закалки на нижний бейнит при выдержке рельсов в ваннах с расплавом смеси солей NaNO₃ и KNO₃ в течение 30 мин при температуре 320 – 340 °C.

Важным результатом работы [7] является установленный путем тензометрирования факт наличия сжимающих остаточных напряжений (порядка 12 – 15 кГ/мм²) на поверхности катания головки рельсов, закаленных на нижний бейнит.

Авторы работы [7] отмечают, что наличие сжимающих напряжений на поверхности катания рельсов повышает предел контактной выносливости металла, что должно повысить эксплуатационную стойкость рельсов.

Отметим, что в более поздней работе Н.И. Кобаско [8] получил факт благоприятного воздействия сжимающих остаточных напряжений на повышение ресурса эксплуатации стальных деталей. Заслуживает внимания отмеченное авторами работы [7] снижение степени коробления рельсовых проб, закаленных на нижний бейнит.

Несмотря на полученные в работах [6,7] обнадеживающие результаты в отношении прочности и пластичности металла, идея изотермической закалки рельсов в смеси расплавленных солей не получила распространения, что можно объяснить объективными трудностями использования агрессивной закалочной среды в промышленных условиях. В зарубежных публикациях технология закалки рельсов на нижний бейнит освещается крайне скупо; упоминается лишь об использовании сжатого воздуха в процессе изотермической закалки.

В настоящей работе предлагается использовать при изотермической закалке рельсов на нижний бейнит экологически чистую закалочную среду – техническую воду цеховой температуры. Предполагается, что охлаждение рельса с прокатного нагрева осуществляется с использованием водокапельных форсунок центробежного типа, позволяющих в широких пределах регулировать расход воды и соответствующую интенсивность охлаждения поверхности рельса.

При этом конструкция закалочного устройства должна обеспечить возможность дифференцированного (раздельного) регулирования расходов воды, посту-

пающей к отдельным участкам рельса (головке, шейке, подошве).

Замена закалочной среды (холодная вода вместо расплава солей) представляет собой достаточно радикальное изменение технологии закалки стали и нуждается в решении комплекса проблем, к числу которых относится обоснование рациональных режимов охлаждения рельсов, разработка конструкции закалочного устройства, а также системы автоматического управления расходом охлаждающей среды.

В настоящей работе уделяется внимание решению двух вопросов – определению рациональных режимов изотермической закалки рельсов, а также анализу эпюры остаточных напряжений в головке рельсов, подвергаемых закалке на нижний бейнит.

Обеспечение изотермической закалки рельсов при использовании воды в качестве закалочной среды

Реализация изотермической закалки рельсов в интервале температур бейнитного превращения (300 – 400 °С) с использованием холодной воды в качестве закалочной среды нуждается в снижении охлаждающей способности воды.

Известно, что погружение рельсов в холодную воду сопровождается закалкой стали на мартенсит и нередко приводит к возникновению трещин вследствие чрезмерного охрупчивания металла.

Снижение охлаждающей способности воды достигается путем подачи воды к охлаждаемой поверхности изделия в импульсном режиме с использованием частичного обогрева поверхности за счет тепла, аккумулированного изделием перед закалкой, т.е. за счет эффекта «самоотпуска» [9].

На рис. 1 приведены результаты эксперимента по охлаждению образца из никеля (цилиндр диаметром 60 мм, высотой 180 мм) водовоздушным спрейером при регулируемой (с использованием микроЭВМ) подаче воды и воздуха по таким режимам, при которых изменение во времени температуры поверхности образца подчиняется заранее заданному режиму [10]. Связь между компьютером и спрейером осуществляется при помощи аналого-цифровых преобразователей.

На вход управляющей системы поступает текущее значение температуры опытного образца (от термопары, приваренной к образцу), на выходе фиксируются вычисляемые компьютером значения давлений воды и воздуха распылительной системы. В память компьютера вводятся аналитические выражения начальной температуры образца ($T_0 = 800$ °С) и заданной температуры поверхности на протяжении четырех последовательных интервалов времени, показанной штриховой линией на рис. 1.

Математическая модель процесса охлаждения опытного образца, встроенная в память компьютера, позволяет прогнозировать необходимую интенсивность наружного охлаждения и текущие (импульсные) значения давлений воды и воздуха в системе спрейерного охлаждения.

Графики, представленные на рис. 1, иллюстрируют изменение значений давления воды и воздуха, обеспечивающие соблюдение заданного режима охлаждения образца. Здесь наибольший интерес представляет интервал времени от 40 до 60 с, на протяжении которого система охлаждения должна обеспечить выдержку металла в интервале температур 370 – 390 °С.

Как следует из рис. 1, указанная изотермическая выдержка металла обеспечивается при полном отключении водяных форсунок и весьма низком (близком к

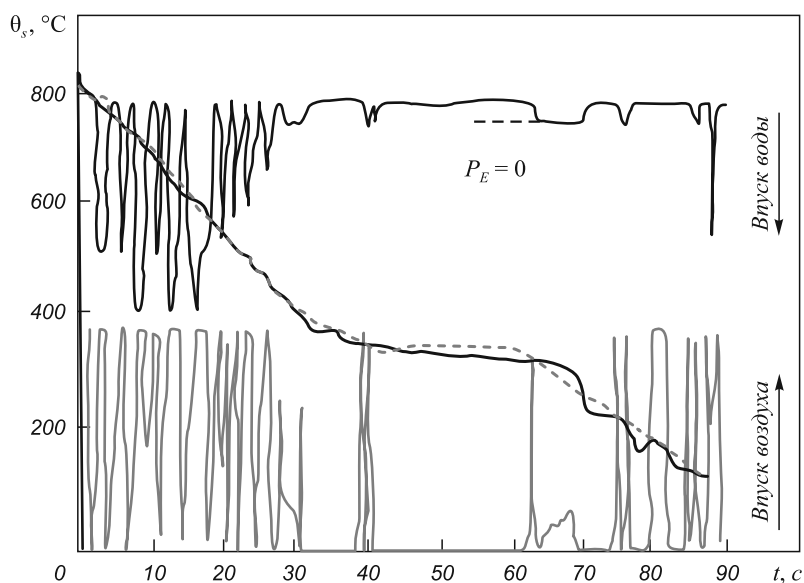


Рис. 1. Управление скоростью охлаждения и выдержкой металла при постоянной температуре при импульсном режиме водовоздушного охлаждения (эксперимент Моро–Аршамболта)

нулю) давлении воздуха. При этом за счет теплообмена излучением температура на поверхности образца на протяжении 20 с снижается весьма незначительно (на 3 – 5 °С) и можно признать, что изотермическая выдержка металла в этом интервале времени удовлетворяет технологическим условиям.

Представленный пример системы управления (с использованием микроЭВМ) импульсным режимом охлаждения металлического образца служит прототипом предлагаемого способа изотермической закалки рельсов на нижний бейнит с использованием технической воды в качестве закалочной среды.

Управление режимом охлаждения рельса в процессе изотермической закалки осуществляется с использованием математической модели, изложенной в работах [11, 12] и позволяющей учитывать кинетику превращений аустенита, а также возникновение термических и структурных напряжений в сечении рельса в процессе остывания. Изменение математической модели, приведенной в работе [11], относится к способу определения температурного поля в сечении рельса с учетом импульсного режима теплоотдачи на поверхности рельса и обеспечения необходимой длительности изотермического превращения аустенита в нижний бейнит ($A \rightarrow B$). Известно, что для стали 30ХГСА и 40ХНМА длительность превращения $A \rightarrow B$ не превышает 25 – 30 мин [3, 4].

В последующих расчетах используется предположение о том, что длительность превращения $A \rightarrow B$ составляет 30 мин, причем наибольшая скорость бейнитного превращения достигается в интервале температур 300 – 400 °С.

Ранее, при обсуждении условий остывания опытного образца в эксперименте Моро-Аршамболта [10], отмечалось, что изотермическая выдержка при температуре 390 °С в течение 10 с обеспечивалась за счет предельного снижения интенсивности наружного охлаждения. Аналогичным образом, при обеспечении изотермической выдержки при закалке головки рельса необходимо на определенное время минимизировать интенсивность наружного охлаждения. При этом достаточно высокая, по сравнению с точкой кипения воды, температура выдержки (350 °С) поддерживается за счет поступления к охлаждаемой поверхности тепла, аккумулированного в центральной части головки рельса. Длительность остывания головки рельса в интервале температур изотермической выдержки (от 400 до 300 °С) зависит от начальной температуры рельса перед закалкой, не превышающей 900 – 950 °С.

Поскольку запасы тепла, аккумулированные головкой рельса перед началом закалки, ограничены, совершенно не очевидно, что этих запасов тепла окажется достаточно для поддержания температуры на поверхности головки в пределах указанного выше интервала температур превращения $A \rightarrow B$ на протяжении 30 минут.

Убедимся в соблюдении данного необходимого условия при решении задачи теплопроводности для остывающего рельса при задании импульсного режима охлаждения на поверхности рельса.

Определение поля температур в закаливаемых рельсах состоит в численном решении уравнения

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + Q(x, y, z, t) \quad (1)$$

с учетом начального условия $T(t_0) = T_i$ при $t = 0$, а также граничных условий на поверхности рельса:

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{пов}} = \alpha (T_{\text{пов}} - T_s), \quad (2)$$

где: T – температура; t – время; λ , ρ , C – коэффициенты теплопроводности, массовой плотности и удельной теплоемкости металла соответственно; Q – объемная плотность источника тепла, сопровождающего протекание фазовых превращений; T_s – температура охлаждающей среды; T_i – начальное значение температуры рельса; n – нормаль к его поверхности; α – эффективное (усредненное) значение коэффициента теплоотдачи на поверхности рельса.

Плотность источника тепла фазового превращения имеет вид: $Q = \rho L \frac{\partial \Psi}{\partial t}$, где $\Psi(x, y, t)$ – доля превращенного аустенита, L – удельная теплота фазовых переходов.

Режим изотермической закалки головки рельса в интервале температур превращения $A \rightarrow B$ может быть обеспечен при строгом соблюдении заданной зависимости от времени коэффициента теплоотдачи на поверхности катания головки.

На основании проведенной серии расчетов по определению температурного поля рельсов предлагается разделить полную длительность охлаждения рельса при закалке на три периода:

- начальный период длительностью 120 с, в течение которого осуществляется подстуживание головки рельса с последующим низким отпуском,
- период изотермической закалки головки рельса длительностью 1800 с при импульсном (периодическом во времени) изменении коэффициента теплоотдачи;
- заключительная стадия остывания рельса на воздухе, либо при сниженной интенсивности форсуночного охлаждения.

Целью подстуживания поверхности катания головки в первом периоде является снижение неравномерности температурного поля вдоль вертикальной оси рельса, что благоприятно сказывается на распределении временных и остаточных напряжений при последующей закалке.

Изменение во времени коэффициента теплоотдачи в первом периоде задано следующим соотношением:

$$\alpha = AK1 + (A01 - AK1) \exp\left(-20 \frac{t}{tk}\right) \text{ при } t \rightarrow t_0; \quad (3)$$

$$\alpha = A_S \text{ при } t = t_0 \rightarrow t_1, \quad (4)$$

где: $A01 = 3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$; $AK1 = 1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$; $A_S = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$; $tk = 5000 \text{ с}$; $t_0 = 15 \text{ с}$; $t_1 = 120 \text{ с}$.

Второй период охлаждения рельса (период изотермической заковки) характеризуется заданием эффективного коэффициента теплоотдачи в виде периодической ступенчатой функции, график которой показан на рис. 2. При выборе максимальных значений коэффициента теплоотдачи в этом периоде учитывали уровень коэффициентов теплоотдачи при изотермической заковке стальных изделий в расплаве солей, изменяющихся, как показано экспериментами Д.Я. Вишнякова [13], в пределах $400 - 600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Пиковые значения коэффициента α в данном периоде приняты постепенно снижающимися от 1000 до

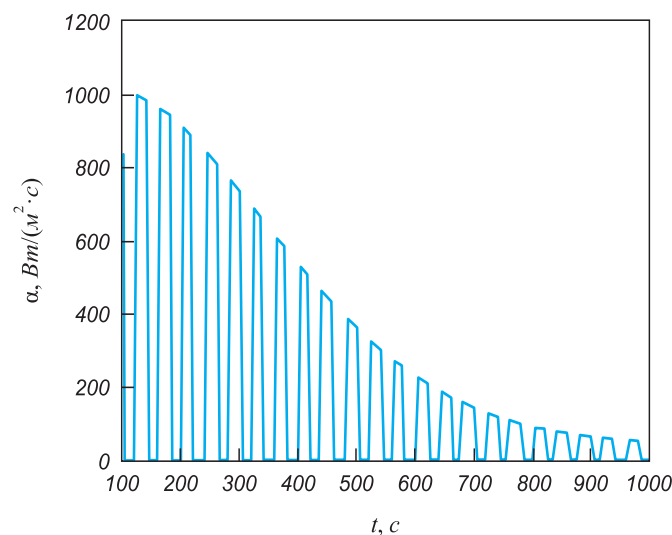


Рис. 2. Задание коэффициента теплоотдачи в виде импульсной функции времени

$50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Интервал времени между пиковыми значениями α принят равным 20 с.

Значения коэффициента α в промежутках между пиковыми значениями принимали равными нулю, что вызывало локальное повышение температуры поверхности головки рельса за счет тепла, поступающего из внутренних объемов головки.

Результаты расчетного определения температур в нескольких представительных точках поперечного сечения рельса (указанных на рис. 3), представлены графиками на рис. 4, а.

Расчеты выполнены в соответствии с математической моделью, описание которой приведено в работах [11, 12], при задании следующих теплофизических свойств стали: $\rho = 7500 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\lambda = 30 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$; $C = 628 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{град}$; $T_S = 20 ^\circ\text{С}$; $L = 75,8 \text{ кДж}/\text{кг}$ (для превращения аустенита в перлит); $L = 20 \text{ кДж}/\text{кг}$ (для превращения аустенита в нижний бейнит).

Как видно из рис. 4, а, при задании коэффициента теплоотдачи α в виде ступенчатой (импульсной) функции с постепенно снижающейся амплитудой, удается удержать температуру на поверхности катания головки рельса в пределах интервала температур бейнитно-

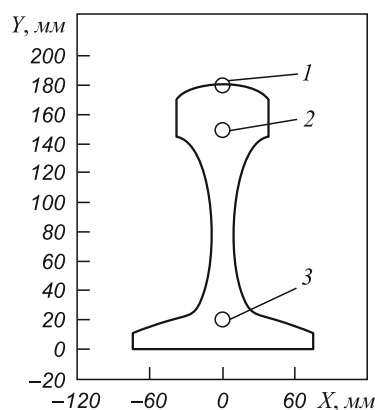


Рис. 3. Схема размещения контрольных точек в поперечном сечении рельса

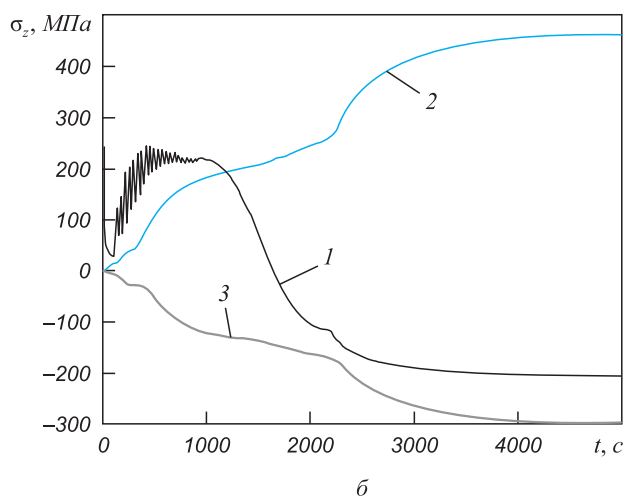
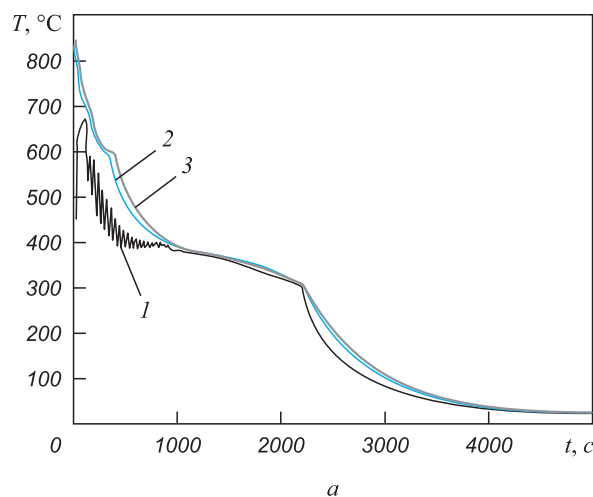


Рис. 4. Изменение во времени температур (а) и продольных напряжений (б) в контрольных точках поперечного сечения рельса

го превращения (300 – 400 °С) на протяжении отрезка времени, равного 1800 с и достаточного для превращения 60 % исходного аустенита в нижний бейнит. Как показано ниже, при такой степени превращения $A \rightarrow B$ поверхностный слой головки рельса подвержен воздействию сжимающих остаточных напряжений, что благоприятно сказывается на износостойкости рельса.

Результаты проведенного расчетного анализа свидетельствуют о том, что при задании коэффициента теплоотдачи в виде импульсной функции представляется возможным обеспечить проведение изотермической закалки головки рельса из стали 30ХГСА или 40ХНМА на нижний бейнит при использовании холодной воды в виде закалочной среды.

Необходимо отметить определенную ограниченность полученного результата. Хорошо известно, что при повышении степени легирования стали марганцем или хромом весьма существенно возрастает длительность инкубационного периода превращений типа $A \rightarrow B$.

К примеру, для стали 48Г4, содержащей, %: 0,48 С; 0,26 Si и 4,33 Mn, длительность превращения аустенита в нижний бейнит возрастает до 7 – 10 ч. Аналогичная длительность превращения $A \rightarrow B$ характерна для стали 54Х3, содержащей, %: 0,54 С; 0,23 Si; 0,32 Mn и 3,54 Cr. Очевидно, что при столь высокой степени легирования стали указанными элементами (Mn, Cr) количество тепла, аккумулированного головкой рельса при нагреве под прокатку, оказывается недостаточным для поддержания температуры головки рельса при температурах 300 – 400 °С в течение нескольких часов при попытках импульсного режима охлаждения с использованием холодной воды в качестве закалочной среды.

Анализ эпюры напряжений в головке рельса при изотермической закалке на нижний бейнит

Математическая модель термонапряженного состояния рельса, приведенная в работах [11, 12], позволяет исследовать характер распределения временных и остаточных напряжений в головке рельса, подвергаемой изотермической закалке. Значения чисто термических напряжений зависят от коэффициента линейного расширения α_T . При расчетах структурных напряжений, обусловленных протеканием в металле фазовых превращений, используются следующие предположения: коэффициент термического расширения заменяется эквивалентным коэффициентом расширения стали β , при определении которого используется правило аддитивности, согласно которому

$$\beta = \beta_A + \beta_P + \beta_B = A(t)\beta_A^m + P(t)\beta_P^m + B(t)\beta_B^m, \quad (5)$$

где β_A^m , β_P^m , β_B^m – максимальные значения коэффициентов расширения отдельных фаз – аустенита, перлита и бейнита соответственно, $A(t)$, $P(t)$, $B(t)$ – относительные

количества отдельных фаз, нарастающие во времени.

Для случая превращения аустенита в нижний бейнит относительное количество бейнита определяется по формуле Колмогорова–Аврами–Мейла

$$B(t) = B_k \left\{ 1 - \exp \left[-kB(t - tB)^n \right] \right\}, \quad (6)$$

где tB – длительность инкубационного периода изучаемой стали; B_k – предельное относительное количество превращенного аустенита, зависящее от температуры превращения; коэффициент kB рассчитывается по формуле, приведенной в работе [14]:

$$kB = \frac{0,693}{\left[A \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \right]^n}, \quad (7)$$

где Q – энергия активации превращения; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура превращения; $A = 0,086 = \text{const}$.

Следуя работе [14], примем параметры Q и n равными: $Q = 11\,700$ кал/моль, $n = 4,8$ и рассчитаем по формуле (7) коэффициент скорости превращения kB при температуре превращения $T = T_B = 623$ К (350 °С): $kB = 1,75 \cdot 10^{-15} \text{ с}^{-n}$.

Максимальные значения коэффициентов линейного расширения отдельных фаз приняты равными: $\beta_A^m = 2,08 \cdot 10^{-5}$, $\beta_P^m = -1,52 \cdot 10^{-5}$, $\beta_B^m = -2,25 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$.

Результаты расчетов количества бейнита и соответствующие значения продольных напряжений в контрольных точках поперечного сечения рельса представлены на рис. 4 – 6.

Из рис. 5, б следует, что при задании импульсного режима теплоотдачи напряжения на поверхности катания головки рельса (т. 1) изменяются в режиме термостатирования, причем амплитуда колебаний продольных напряжений достигает значений 100 – 110 МПа в моменты времени $t = 250 - 300$ с и постепенно затухает при $t > 1000$ с.

Кривые на рис. 6 отражают синхронность процессов нарастания количества нижнего бейнита в головке рельса $B(t)$ и снижения соответствующих значений продольных напряжений $\sigma_x(t)$ на поверхности катания головки (т. 1), а также на расстоянии 10 мм (т. 2) от поверхности катания.

Характерно, что снижение напряжений в головке наблюдается лишь в точках 1 и 2, т.е. в пределах полосы прокаливаемости (15 мм) головки рельса.

В термическом центре головки рельса, расположенном на расстоянии 30 мм от поверхности катания, преобладают растягивающие напряжения, как показано на рис. 4, б и 5, б.

Следует еще раз подчеркнуть, что зона расположения сжимающих напряжений ограничена полосой прокаливаемости металла на нижний бейнит вблизи от поверхности катания головки. На рис. 7 представлено

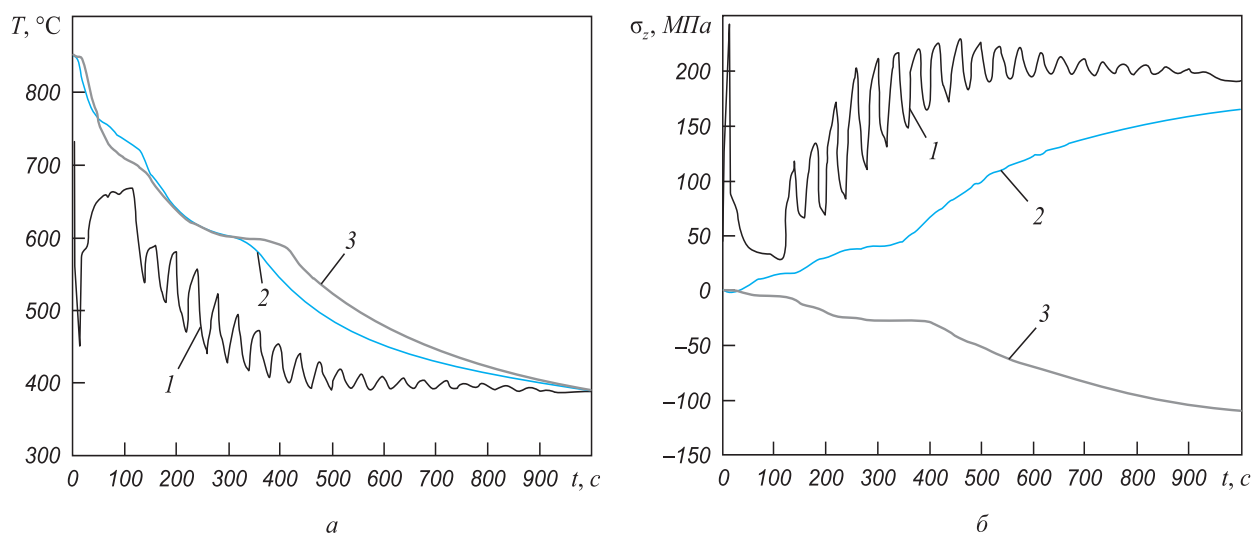


Рис. 5. Изменение во времени температур (а) и продольных напряжений (б) в контрольных точках поперечного сечения рельса при импульсном режиме охлаждения на участке длительностью 1000 с

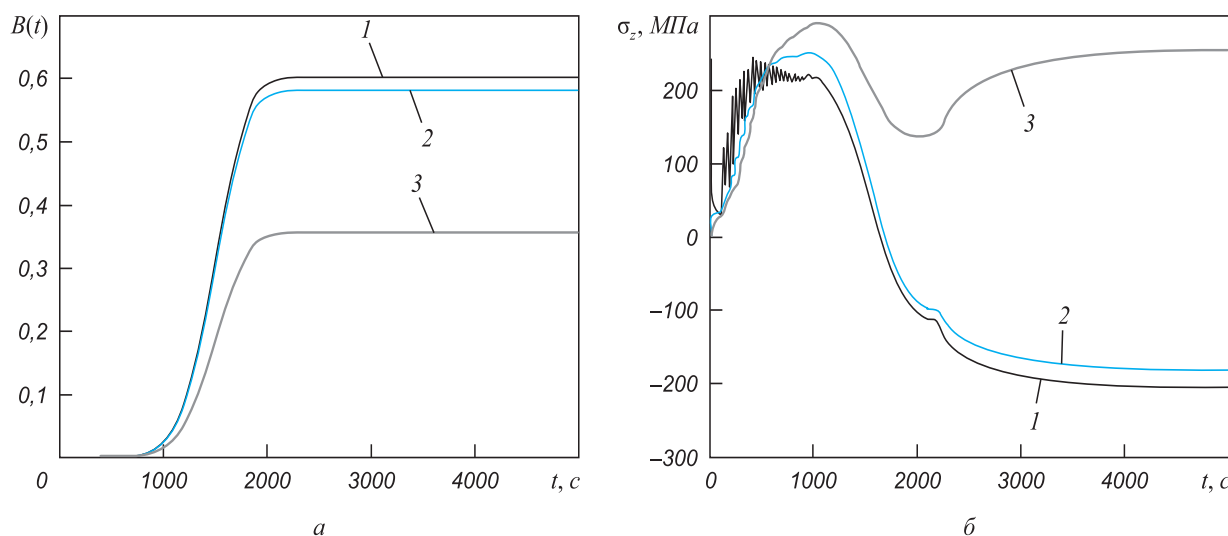


Рис. 6. Изменение во времени количества бейнита (а) и продольных напряжений (б) в трех точках головки рельса, расположенных на поверхности катания (1) ($Y = 180 \text{ мм}$) и на расстоянии 10 мм (2) ($Y = 170 \text{ мм}$) и 20 мм (3) ($Y = 160 \text{ мм}$) от поверхности катания

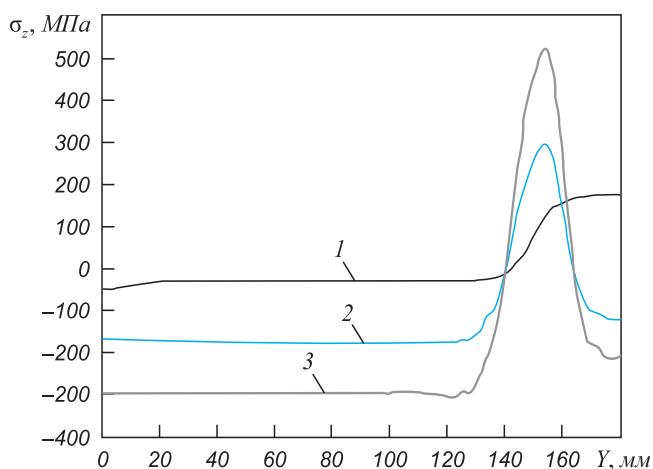


Рис. 7. Распределение продольных напряжений вдоль оси рельса для трех моментов времени, с:
1 – 400; 2 – 2200; 3 – 5000

распределение продольных напряжений вдоль оси поперечного сечения рельса для трех характерных моментов времени. Видно, что отрицательные (сжимающие) напряжения ограничены полосой металла, толщина которой не превышает 15 мм, а на расстоянии 26 – 27 мм от поверхности катания в головке рельса возникают растягивающие напряжения, максимальные значения которых достигают 500 – 510 МПа.

Установленные расчетом закономерности термонапряженного состояния головки рельса дают основания для заключения о том, что изотермическая закалка головки на нижний бейнит, осуществляемая при импульсном режиме охлаждения головки, может способствовать повышению износостойкости рельсов. Это заключение основано на возникновении сжимающих напряжений в слое металла, примыкающем к поверхности катания головки, следствием чего является по-

вышение контактной прочности металла со структурой нижнего бейнита.

Практическое использование предложенного способа изотермической закалки рельсов на нижний бейнит нуждается в экспериментальном определении (уточнении) ряда параметров изучаемого процесса.

В частности, необходимо уточнить значение коэффициента линейного расширения нижнего бейнита, а также ряда показателей импульсного режима охлаждения – амплитудных значений коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$ и длительности Dt интервалов времени между парой смежных импульсов подачи охлаждающей среды (холодной воды).

Выводы. Показана возможность осуществления изотермической закалки железнодорожных рельсов формата Р65 с формированием структуры нижнего бейнита в головке рельса за счет импульсного режима охлаждения головки холодной водой в течение 25 – 30 мин. При этом полная длительность остывания рельса при закалке разделяется на три стадии – начальная стадия подстуживания головки рельса (100 – 120 с), стадия импульсного охлаждения (1800 с) и заключительная стадия остывания рельса на воздухе.

Формирование зоны нижнего бейнита на поверхности катания обеспечивает существенное упрочнение металла в этой зоне по сравнению со случаем структуры пластинчатого перлита, который образуется при традиционном способе термоупрочнения рельсов путем объемной закалки в масле. Весьма существенной особенностью предлагаемого способа термоупрочнения рельсов является факт возникновения сжимающих

напряжений в зоне металла, закаленного на нижний бейнит, что способствует повышению его контактной прочности и увеличению износостойкости рельсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боер Х.-Д., Датта С., Кайзер Г.-Ю. // Черные металлы. 1995. № 2. С. 29 – 36.
2. Термически упрочненные рельсы / А.Ф. Золотарский, Я.Р. Раузин, Е.А. Шур и др. – М.: Транспорт, 1976. – 264 с.
3. Певзнер Л.М. // Журнал технической физики. 1949. Т. 19. Вып. 4. С. 481 – 491.
4. Певзнер Л.М. Металловедение и термическая обработка. – М.: Машгиз, 1955. С. 74 – 107.
5. Потак Я.М. Высокопрочные стали. – М.: Металлургия, 1972. – 290 с.
6. Приданцев М.В., Казарновский Д.С., Данилов В.И. и др. // Сталь. 1965. № 4. С. 358 – 361.
7. Казарновский Д.С., Приданцев М.В., Бабич А.П. и др. // Сталь. 1970. № 5. С. 465 – 468.
8. Кобаско Н.И., Николин Б.И., Драчинская А.Г. и др. // Изв. вуз. Машиностроение. 1987. № 10. С. 153 – 157.
9. Зимин Н.В., Акимов И.К. // Металловедение и термическая обработка металлов. 1964. № 6. С. 28 – 31.
10. Моро Ф., Аршамболт П. // Промышленная теплотехника. 1989. Т. 11. № 3. С. 48 – 55.
11. Самойлович Ю.А. // Металлург. 2011. № 11. С. 65 – 72.
12. Самойлович Ю.А. // Металлург. 2011. № 12. С. 57 – 64.
13. Вишняков Д.Я. Свойства расплавленных солей, применяемых в ваннах пач. // Структура и свойства стали. Тр. Московского института стали. 1949. Вып. 27. С. 126 – 175.
14. Umemoto M., Horiuchi K., Tamura I. // Trans. of ISIJ. 1982. Vol. 22. P. 854 – 861.

© 2012 г. Ю.А. Самойлович
Поступила 24 сентября 2012 г.