

УДК 669.18: 621.746.047.007

Ю.А. Самойлович

Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники

ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ КОРОБЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗ БЕЙНИТНОЙ СТАЛИ

В настоящее время упрочнение железнодорожных рельсов на отечественных металлургических предприятиях осуществляется путем объемной закалки в масле [1]. В ходе последующей термообработки (остывание на воздухе, отпуск, нормализация) рельсы претерпевают значительное искривление, для устранения которого используется правка в холодном состоянии на ролико-правильных машинах. Правка позволяет радикально уменьшить степень коробления рельсов, однако сопровождается наведением в рельсах остаточных напряжений, существенно снижающих стойкость рельсов при последующей эксплуатации. Особую актуальность проблема коробления рельсов приобретает в связи с освоением рельсов повышенной прочности, обладающих высокими показателями предела текучести.

В работах [2, 3] представлены результаты исследований по освоению производства рельсов из стали бейнитного класса, обеспечивающих существенное повышение прочности рельсовой стали при достаточно высокой пластичности.

Для производства рельсов повышенной прочности авторами работы [2] рекомендуется сталь следующего состава, %: 0,3 – 0,4 C, 1,1 – 1,3 Si, 1,4 – 1,6 Mn, 1,0 – 1,1 Cr, 0,2 – 0,4 Mo, 0,1 – 0,15 V, 0,005 – 0,010 Al при содержании примесей фосфора и серы не более чем по 0,025 %. По данным работы [2] при указанном составе стали металл рельсов при охлаждении на воздухе с прокатного нагрева обладает высокой твердостью и прочностью (HV_{401} , $\sigma_b = 1330$, $\sigma_T = 1100$ МПа) наряду с достаточно высокими показателями ударной вязкости (61 Дж/см²).

В работе [3] получены еще более высокие показатели прочности стали марок 40ХГСМ и 40ХГСН ($\sigma_b = 1505 - 1510$, $\sigma_T = 1142 - 1177$ МПа) при использовании следующего режима термической обработки: замедленное охлаждение рельсов с прокатного нагрева на воздухе плюс отпуск при 500 °С.

Важным результатом исследований следует признать выявленную в данной работе проблему затруднений с холодной правкой рельсов на роликоправильной машине.

В практике производства рельсов известен факт весьма значительного искривления (коробления) при остывании на воздухе с высоких температур. По наблюдениям Маханека, приведенным в работе [4], стрела

прогиба рельсов типа Р43 достигает 26 см при остывании на воздухе с прокатного нагрева. В работе [3] отмечается, что при высоких значениях предела текучести рельсовой стали бейнитного класса существующее оборудование рельсобалочного цеха Нижнетагильского металлургического комбината пока не позволяет выполнить роликовую правку, что потребовало повысить температуру отпуска стали с 300 °С, при которой достигается оптимальный уровень механических свойств, до 500 °С. Можно предположить, что с увеличением мощности роликоправильной машины удастся осуществить правку рельсов с более высоким пределом текучести, однако при такой правке в рельсах возникнут и более высокие остаточные напряжения, значительно снижающие их эксплуатационную стойкость.

Рассмотрение результатов исследований [2, 3] дает основание для следующего заключения. Проблема производства рельсов из стали бейнитного класса не сводится к выбору оптимального химического состава стали: рациональное легирование металла необходимо выбирать в сочетании с определением таких технологических условий производства рельсов, при которых будет обеспечено их минимальное коробление.

В настоящей работе предлагается способ определения рациональных режимов закалки отпуска рельсов, при которых достигается минимальная степень их коробления к моменту завершения процесса термической обработки.

Для достижения указанной цели представляется необходимой определенная перестройка закалочных систем охлаждения рельсов, которая может обеспечить раздельное (дифференцированное) охлаждение головки и подошвы рельса. Как отмечено в работе [5], крупные зарубежные производители рельсов отдают предпочтение дифференцированной закалке, одним из основных достоинств которой является обеспечение прямолинейности рельсов. В последние годы и на отечественных предприятиях ведутся исследования по использованию режима дифференцированной закалки при термической обработке рельсов, однако эти исследования в большинстве случаев носят эмпирический характер. Предлагается целесообразным использовать современные методы компьютерного анализа термонапряженного состояния стальных изделий в процессе термообработки в качестве дополнения к экспериментальным исследова-

дованиям. Ниже представлены результаты определения рациональных режимов термической обработки рельсов с использованием математической модели термонапряженного состояния рельсов [6].

При анализе режима термообработки рельса будем исходить из следующих предположений:

- целью термической обработки является упрочнение металла головки рельса и снижение степени коробления;

- упрочнение головки рельса осуществляется в результате превращения исходного аустенита в нижний бейнит;

- снижение степени коробления достигается за счет возможности раздельного (дифференцированного) термического воздействия на подошву и головку рельса.

Учитывая наличие современного опыта производства рельсов из бейнитной стали при их остывании на воздухе с прокатного нагрева [2, 3], будем сопоставлять результаты расчетов напряжений и деформаций в рельсах для двух режимов термической обработки – при изотермической выдержке на нижний бейнит (T_1) и при охлаждении рельсов на воздухе с прокатного нагрева (T_2).

Существенное различие указанных режимов термообработки рельсов поясняется схемой, показанной на рис. 1, где указаны две траектории изменения температуры металла по отношению к полям существования перлита (P) и нижнего бейнита (B) на диаграмме изотермического превращения аустенита. При остывании рельса с прокатного нагрева на воздухе (траектория T_1) представляется возможным превращение аустенита в перлит (в зоне P), после чего оставшийся аустенит может частично превращаться в нижний бейнит (в зоне B), так что в конечной структуре следует ожидать сложной и недостаточно однородной перлит-бейнитной смеси.

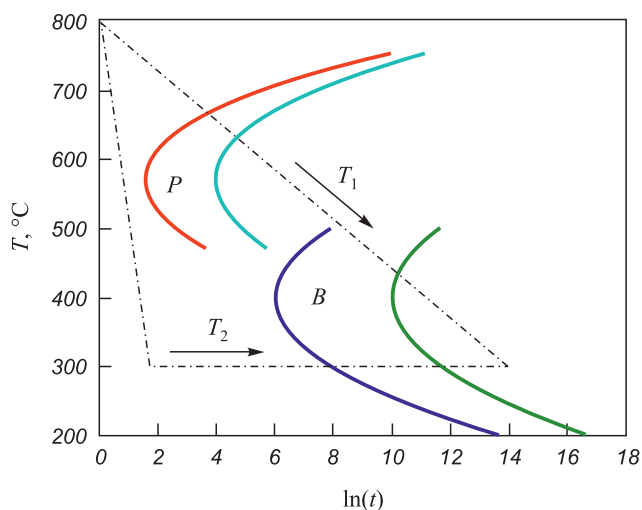


Рис. 1. Диаграмма изотермического превращения аустенита в перлит (P) и нижний бейнит (B):

T_1, T_2 – две траектории изменения температуры металла при закалке

Изменение температуры металла вдоль траектории T_2 позволяет избежать перлитного превращения и обеспечивает получение однородной структуры нижнего бейнита при изотермической выдержке в так называемой «средней» (промежуточной) зоне температур $300 - 420^\circ\text{C}$, что представляется более предпочтительным условием повышения прочности металла головки рельса.

Представленная в работе [6] математическая модель используется для исследования двух вопросов – особенностей термонапряженного состояния рельсов при их упрочнении путем изотермической закалки на нижний бейнит (A) и возможности управления процессом коробления рельсов при дифференцированной закалке подошвы и головки рельсов (B).

А. Термонапряженное состояние рельсов при упрочняющей закалке

Ознакомление с зарубежным опытом [7] указывает на возможность существенного повышения прочности рельсов при переходе на другую структуру металла, в частности, на структуру нижнего бейнита, обладающего твердостью HB 400 и временным сопротивлением $\sigma_B \approx 1400 - 1450$ МПа. Идея упрочнения стали путем изотермической закалки на нижний бейнит известна достаточно давно и вначале была апробирована в ходе лабораторных экспериментов [8, 9].

При этом быстрое охлаждение металла от исходной температуры ($810 - 850^\circ\text{C}$) до температуры изотермической выдержки достигалось путем погружения образцов в ванну с расплавом селитры, либо расплавленного свинца. Отечественный опыт изготовления рельсов из стали бейнитного класса относится к 1965 – 1970 гг. В исследованиях Приданцева-Казарновского [10, 11] упрочнение рельсов легированной (хромистой) стали достигалось путем изотермической выдержки в ванне с расплавом смеси щелочей NaNO_3 и KNO_3 . Несмотря на полученные в этих исследованиях обнадеживающие результаты в отношении упрочнения рельсов, идея изотермической закалки рельсов в расплаве щелочей не получила распространения в промышленности, что в значительной степени определяется агрессивностью закалочной среды (расплав селитры). Тем не менее, исследования Приданцева-Казарновского следует признать весьма важными. Во-первых, эти исследования подтвердили факт возможности повышения прочности железнодорожных рельсов до значений $\sigma_B \approx 1400 - 1450$ МПа при высоких показателях пластичности. Во-вторых, авторы работы [11] отметили, что изотермическая закалка рельсов существенно снижает степень их коробления, что имеет прямое отношение к некоторым изложенным ниже результатам теоретического анализа.

Анализ термонапряженного состояния рельсов из бейнитной стали выполняется с учетом закономернос-

тей кинетики бейнитного превращения аустенита. Исследования по кинетике превращений аустенита в так называемой средней области температур (300 – 420 °С) позволили выявить следующие особенности превращения аустенита в нижний бейнит [12, 13]:

- длительность инкубационного периода и собственно превращения $A \rightarrow B$ существенно зависят от химического состава стали;

- превращение аустенита в нижний бейнит никогда не проходит до конца, причем количество превращенного аустенита зависит от температуры превращения.

К примеру, для весьма распространенной в производстве стали 37ХГС, содержащей 0,37 % С, 1,34 % Si, 1,06 % Mn и 1,86 % Cr длительность инкубационного периода не превышает одного часа, примерно такое же время протекает превращение аустенита в нижний бейнит.

При этом количество превращенного аустенита по окончании процесса превращения составляет 35 % при $T = 400$ °С, 55 % при $T = 350$ °С и 70 % при $T = 300$ °С.

Учитывая необходимость охлаждения головки рельса от исходной температуры аустенизации (1073 – 1123 К) до температуры бейнитного превращения (600 – 650 К), разделим полную длительность термоупрочнения рельса на три периода:

- период 1 – охлаждение рельса от исходной температуры до температуры бейнитного превращения;
- период 2 – превращение аустенита в нижний бейнит;
- период 3 – устранение коробления рельса.

Для периода 2 при описании кинетики бейнитного превращения использованы результаты исследований [12 – 14]. В частности, полная длительность периода 2 принята равной 7000 с (сумма длительности индукционного периода и собственно превращения $A \rightarrow B$).

Для периода 3 параметры теплового режима определяются с использованием изложенной выше математической модели термонапряженного состояния рельса путем перебора ряда вариантов, в каждом из которых показатели режима охлаждения сопоставляются с получаемой степенью коробления рельса.

Поле температур рельса определено путем численного решения уравнения теплопроводности при задании следующих физических параметров рельсовой стали: $\rho = 7500$ кг/м³, $\lambda = 30$ Вт/м·К, $C = 628$ Дж/кг·К, $L = 18,4$ кал/гр. Режим охлаждения рельса характеризуется заданием коэффициентов теплоотдачи $\alpha = 15$ Вт/м²·К, $\sigma_B = 4 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) и температуры охлаждающей среды T_s вдоль всей наружной поверхности рельса. Ниже представлены найденные путем перебора ряда расчетных вариантов границы окончания каждого из трех периодов (t_i , $i = 1, 2, 3$), а также значения температуры охлаждающей среды коэффициентов теплоотдачи от головки (GAL) и подошвы (PAL) в каждом периоде.

Номер периода	t_i , с	T_s , К	GAL, Вт/м ² ·К	PAL, Вт/м ² ·К
1	2000	400	800	400
2	9000	623	800	400
3	16 000	323	200	320

Принятые в расчетах значения коэффициентов теплоотдачи относятся к случаю использования водо-воздушного (спрейерного) охлаждения головки и подошвы рельсов.

Совместное решение уравнений теплопроводности и нелинейной термовязкоупругости [6] позволяет определить значения температур и продольных напряжений (T , σ_z) в поперечном сечении рельса. Ниже приведены графики изменения во времени указанных параметров для трех представительных точек поперечного сечения рельса, показанных на рис. 2, где цифры 1 и 3 относятся к термическим центрам головки и подошвы, соответственно, а цифра 2 – к центру шейки рельса.

На рис. 3 представлено изменение во времени температур (а) и продольных напряжений (б) в указанных точках рельса за время 14 000 с, включающее периоды охлаждения рельса (2000 с), изотермической выдержки (7000 с) и остывания на воздухе (5000 с).

Расчеты деформаций и напряжений в остывающих рельсах выполнены с учетом динамики превращения аустенита в нижний бейнит согласно уравнению Колмогорова–Мейла–Аврами

$$B(t) = B_0 \{1 - \exp[-k(t - tB)^n]\},$$

где B_0 – предельное количество превращенного аустенита, tB – длительность инкубационного периода, n и k – кинетические параметры бейнитного превращения, принятые равными $n = 4,8$, $k = 1,75 \cdot 10^{-15}$ согласно экспериментальным данным работы [14]. Длительность инкубационного периода принята равной 2700 с, а предельные значения коэффициентов линейного расширения фаз равными: $\beta_1 = 2,08 \cdot 10^{-5}$ (аустенит),

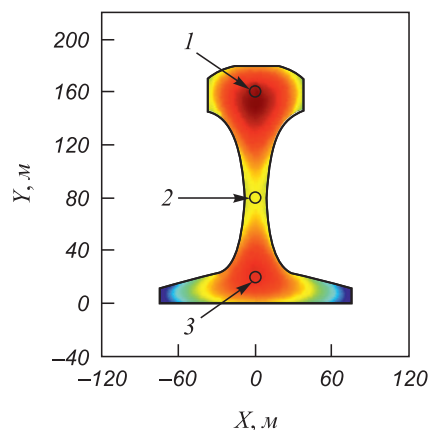


Рис. 2. Размещение контрольных точек 1 – 3 в поперечном сечении рельса типа Р65

$\beta_2 = -1,52 \cdot 10^{-5}$ (перлит), $\beta_3 = -2,25 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (нижний бейнит).

На рис. 4 представлены результаты аналогичных расчетов, выполненных для случая свободного остывания рельса с прокатного нагрева на воздухе.

Из рассмотрения графиков изменения во времени продольных напряжений σ_z в поперечном сечении рельсов (см. рис. 3, 4) можно сделать два основных вывода:

- начальный период охлаждения рельса в режиме изотермической обработки характеризуется преобладанием растягивающих напряжений термического происхождения, поскольку структурные деформации вступают в силу только по завершении индукционного периода бейнитного превращения;

- к моменту полного охлаждения рельсов значения продольных напряжений в рельсах, подвергаемых изотермическому бейнитному превращению, примерно в 2 – 3 раза меньше напряжений, возникающих при сво-

бодном остывании рельсов на воздухе (100 МПа против 210 – 300 МПа).

Процесс изотермической обработки стали при температуре 623 К (350 °С) сопровождается увеличением удельного объема металла и постепенным развитием сжимающих напряжений в головке рельса.

Графики, представленные на рис. 5, позволяют проследить динамику изменений знака и абсолютной величины напряжений вблизи от поверхности катания рельса в процессе превращения аустенита в нижний бейнит. На рис. 5, а показано изменение количества нижнего бейнита в трех слоях металла непосредственно на поверхности головки рельса (1), а также на расстоянии 10 и 20 мм от поверхности катания (2, 3). Из расчетов следует, что для принятого режима охлаждения головки рельса глубина прокаливаемости металла не превышает 22 – 25 мм, причем нарастание количества превращенного бейнита сопровождается синхронным снижением растягивающих продольных напряже-

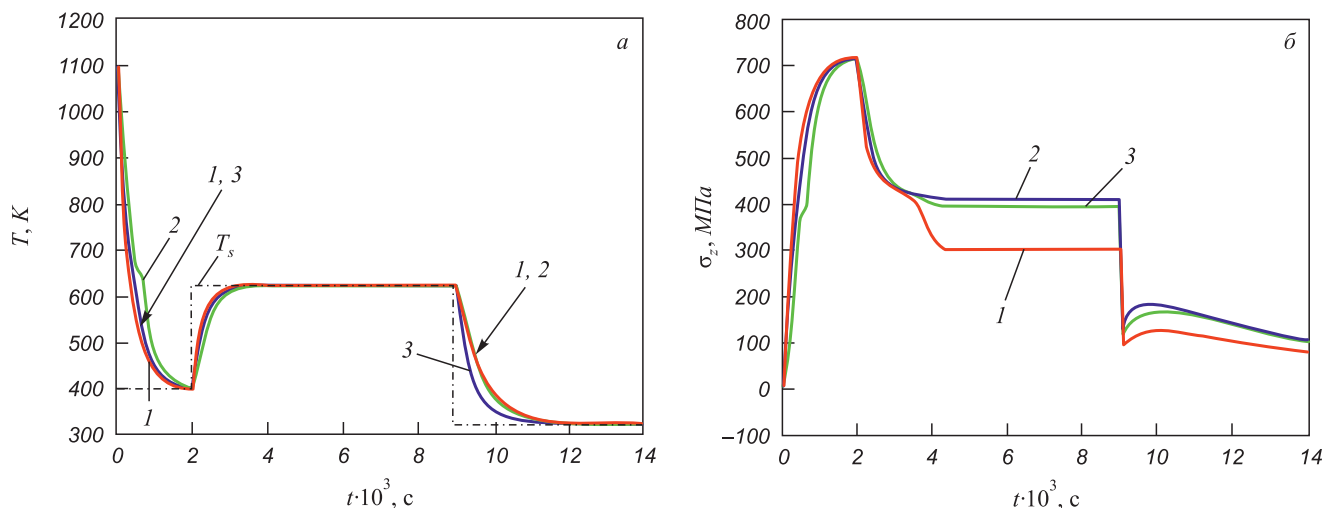


Рис. 3. Изменение во времени температур (а) и продольных напряжений (б) в контрольных точках рельса при ступенчатой закалке, определяемой графиком изменения температуры охлаждающей среды (штриховая линия)

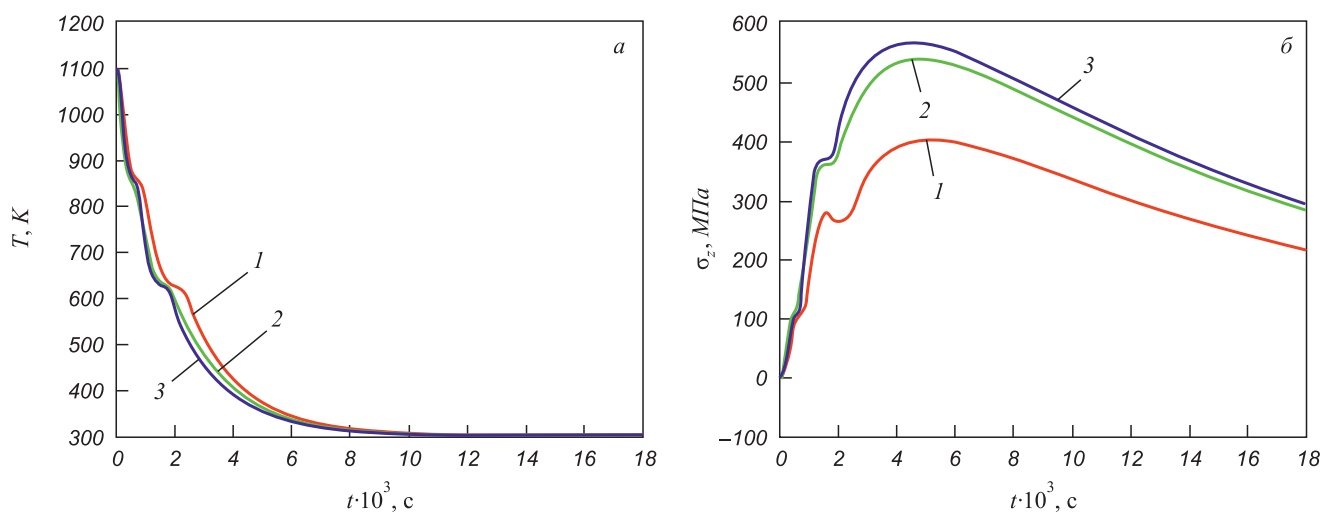


Рис. 4. Изменение во времени температур (а) и продольных напряжений (б) в контрольных точках рельса, остывающего на воздухе с прокатного нагрева

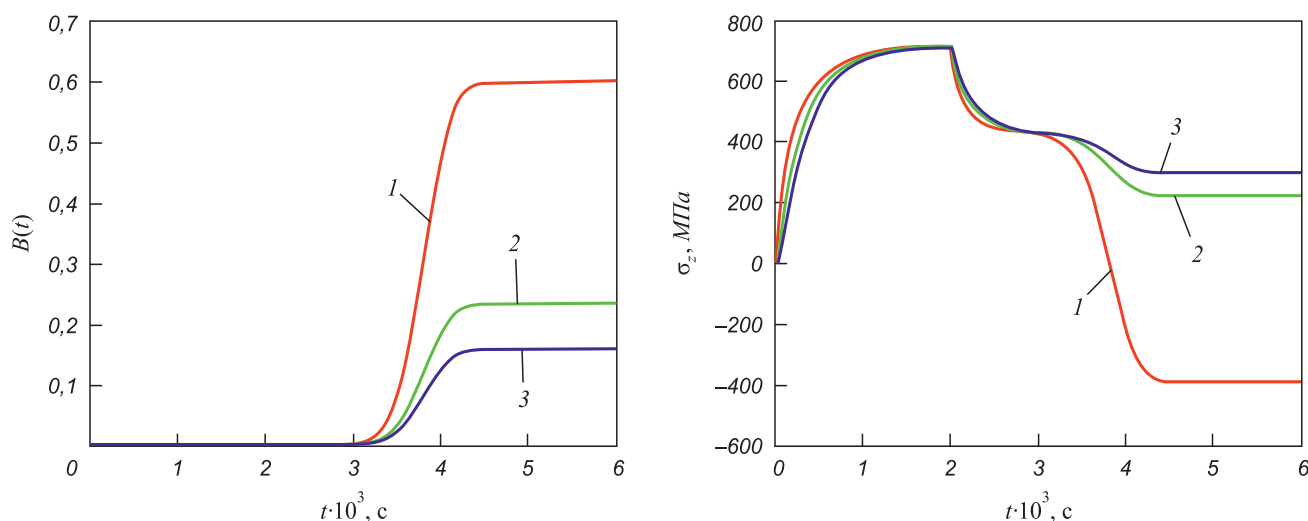


Рис. 5. Изменение во времени количества бейнита в головке рельса (а) и продольных напряжений (б) на нескольких горизонтах по высоте рельса:

1 – непосредственно на поверхности катания; 2, 3 – на расстоянии 10 и 20 мм от поверхности катания, соответственно

ний вследствие увеличения удельного объема металла. При этом, как показано на рис. 5, б, непосредственно на поверхности головки развиваются сжимающие напряжения $\sigma_z = -400$ МПа, а на расстоянии 10 и 20 мм от поверхности – растягивающие напряжения $\sigma_z = 205$ и 300 МПа, соответственно. Можно предположить, что отмеченное в данных расчетах резкое изменение знака и величины напряжений на границе прокаливаемости головки рельса имеет взаимосвязь с провалом значений твердости и прочности вблизи от поверхности катания, обнаруженное экспериментальным путем [15, 16].

Б. Коробление рельсов при закалке

Предложенная математическая модель напряженно-деформированного состояния рельсов позволяет исследовать процесс коробления рельсов при различных режимах термической обработки.

В данной работе представлены результаты анализа изменений прогиба только в вертикальном направлении (по нормали к поверхности катания рельса). Схема, показанная на рис. 6 поясняет фиксирование прогиба

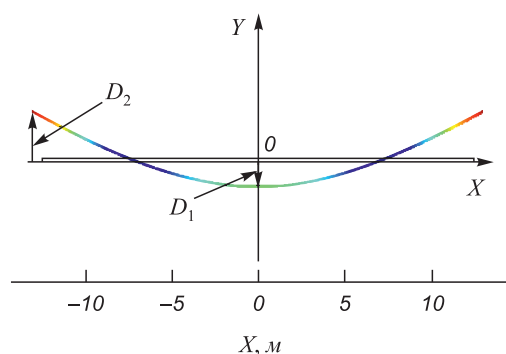


Рис. 6. Схема фиксирования прогиба в центре рельса (D_1) и не его концах (D_2)

для центра рельса (D_1) и его концов (D_2) в предположении о симметрии деформирования рельса вдоль оси X относительно его центра.

Сумма абсолютных значений смещений D_1 и D_2 определяет стрелу прогиба рельса, которая является дополнительным показателем степени коробления.

На рис. 7 представлено изменение смещений D_1 и D_2 в зависимости от времени для двух режимов термической обработки рельса. Главной особенностью процесса остывания рельса в цеховой атмосфере является ускоренное охлаждение подошвы рельса по сравнению с головкой, что вызывает более раннее превращение аустенита в перлит в подошве рельса. Результатом объемного расширения металла при таком превращении является значительное искривление концов рельса на головку, что отражается изменением параметров D_1 и D_2 (рис. 7, б). При этом смещение в центре рельса приобретает отрицательные значения ($D_1 < 0$), а смещения концов рельса – положительные значения ($D_2 > 0$).

К моменту завершения процесса охлаждения рельса стрела прогиба достигает значений 23 – 24 мм, что согласуется с наблюдениями за искривлением рельсов в производственных условиях [4].

Характер искривления рельсов существенно изменяется при термообработке рельсов с изотермической выдержкой в «средней» области температур. Превращение аустенита в нижний бейнит, протекающее в период изотермической выдержки головки рельса, сопровождается расширением металла и приводит к искривлению рельса на подошву при $D_1 > 0$ и $D_2 < 0$, как показано на рис. 7, а.

Расчеты показали, что длительная выдержка рельсов при температуре бейнитного превращения приводит к заметному снижению стрелы прогиба рельса по сравнению со случаем свободного остывания рельса на воздухе. Дополнительные возможности по снижению

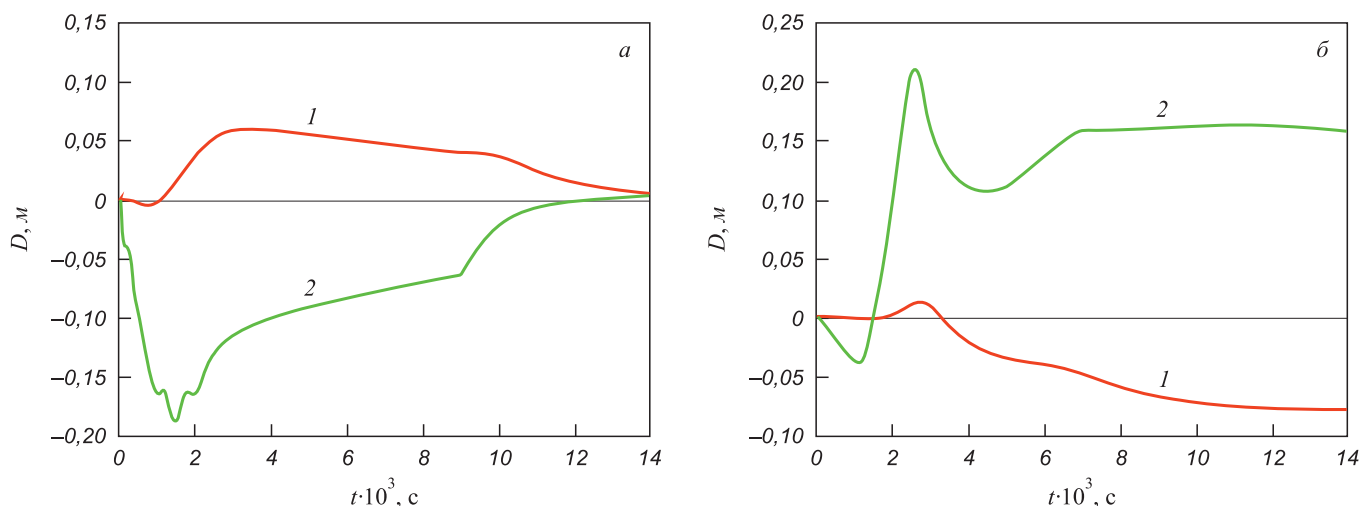


Рис. 7. Изменение во времени смещений по вертикали для центра (1) и концов рельса (2) при изотермической закалке на нижний бейнит (а) и при свободном остывании рельса на воздухе (б)

стрелы прогиба рельса открываются при использовании раздельного (дифференцированного) охлаждения головки и подошвы рельса.

Математическая модель процесса деформирования рельса позволяет фиксировать значения смещений D_1 и D_2 при задании различной интенсивности охлаждения головки и подошвы рельса. Перебор различных значений коэффициентов теплоотдачи от головки и подошвы рельса при одновременном фиксировании значений D_1 и D_2 позволяет подобрать такую пару значений указанных параметров, при которых прогиб рельса непрерывно уменьшается. Теоретически соответствующим подбором различной интенсивности охлаждения головки и подошвы можно полностью «обнулить» стрелу прогиба рельса, как показано на рис. 7, а, при выборе коэффициентов теплоотдачи для заключительной стадии остывания рельса, представленных выше.

Дополнительные особенности коробления рельсов открываются при построении графиков распределения профиля рельсов по их длине для различных моментов времени. На рис. 8 представлены такие графики для обоих случаев термической обработки рельсов. Линией 3 на рис. 8 представлено распределение профиля рельса к моменту завершения процесса охлаждения. В частности, при изотермической закалке рельса (рис. 8, а) следует, что при среднем «обнулении» стрелы прогиба рельса к моменту окончания процесса охлаждения в центральной части рельса сохраняется небольшая степень искривления (около 1 мм). При свободном остывании рельса на воздухе (рис. 8, б) профиль рельса к моменту окончания процесса охлаждения имеет параболические очертания.

Приведенный пример управления процессом коробления рельса преследует цель иллюстрации возмож-

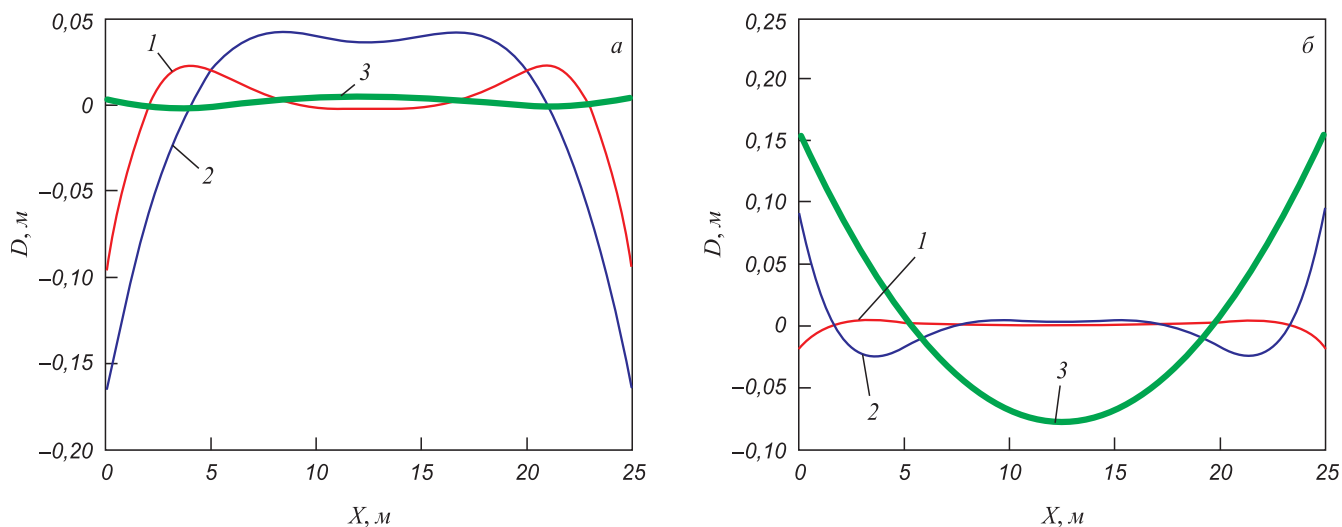


Рис. 8. Профиль рельса при изотермической закалке на нижний бейнит (а) и при свободном остывании на воздухе (б) для моментов времени, с:
1 – 500; 2 – 2000; 3 – 14 000

ностей «тепловой правки» рельсов при использовании технологии дифференцированной закалки, указанные в этом примере значения варьируемых коэффициентов теплоотдачи не претендуют на их практическую реализацию. Подобная оговорка представляется необходимой в связи с упрощениями и допущениями, используемыми при математическом моделировании термонапряженного состояния рельса.

В общем случае методика настройки рациональных режимов термической обработки рельсов является полумпирической. Применение компьютерных расчетов для прогнозирования рациональных режимов изотермической закалки на нижний бейнит должно опираться на достоверные сведения относительно закономерностей превращений аустенита и охлаждающих возможностей закалочной среды. В связи с этим для принятого состава бейнитной рельсовой стали представляется необходимым уточнение вида диаграммы изотермических превращений аустенита, закономерностей превращения аустенита в нижний бейнит, а также конкретных значений коэффициентов линейного расширения продуктов превращения аустенита. Дополнительное уточнение результатов математического моделирования связано с возможным использованием компьютеров повышенной мощности для реализации трехмерного моделирования температур, деформаций и напряжений в остывающих рельсах.

Выводы. Выполнено сопоставление напряжений и деформаций в рельсах из бейнитной стали, подвергавшихся термическому упрочнению по двум режимам – путем охлаждения на воздухе с прокатного нагрева, либо путем изотермической закалки на нижний бейнит. Режим охлаждения рельсов на воздухе упрощает процедуру термической обработки рельсов, однако по ряду причин негативно сказывается на показателях качества рельсов. Расчеты показали, что уровень остаточных напряжений в рельсах, остывающих на воздухе, в 2–3 раза превышает остаточные напряжения в рельсах, подвергавшихся изотермической закалке. Кроме того, охлаждение на воздухе сопровождается существенным короблением рельсов, приводящем после холодной правки к наведению дополнительных остаточных напряжений, снижающих эксплуатационную стойкость рельсов.

Разработана математическая модель термонапряженного состояния железнодорожных рельсов, подвергаемых избирательному упрочнению головки рельсов путем превращения аустенита в нижний бейнит, которое сопровождается искривлением (короблением) рельса. Компьютерная программа, реализующая данную математическую модель, прогнозирует рациональные режимы охлаждения, при которых минимизируется степень искривления рельсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Производство и термическая обработка железнодорожных рельсов / В.В. Лемпицкий, Д.С. Казарновский, С.В. Губерт и др. – М.: Металлургия, 1972. – 272 с.
2. Ворожищев В.И., Павлов В.В., Корнева Л.В. и др. // Сталь. 2005. № 2. С. 71 – 74.
3. Кушнарев А.В., Киричков А.А., Добужская А.Г. и др. // Сталь. 2005. № 6. С. 131 – 133.
4. Померанцев А.А. // Изв. АН СССР. ОТН. 1941. № 2. С. 89 – 115.
5. Павлов В.В., Корнева Л.В., Козырев Н.А. // Сталь. 2007. № 3. С. 82 – 84.
6. Самойлович Ю.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 5. С. 39 – 44.
7. Боер Х.-Д., Датта С., Кайзер Г.-Ю. // Черные металлы. 1995. № 2. С. 29 – 36.
8. Певзнер Л.М. // Журнал технической физики. 1949. Т. 19. Вып. 4, С. 481 – 491.
9. Потак Я.М. Высокопрочные стали. – М.: Металлургия, 1972. – 290 с.
10. Приданцев М.В., Казарновский Д.С., Данилов В.И. и др. // Сталь. 1965. № 4. С. 358 – 361.
11. Казарновский Д.С., Приданцев М.В., Бабищ А.П. и др. // Сталь. 1970. № 5. С. 465 – 468.
12. Коган Л.И., Энтин Р.И. // Сб. «Проблемы металловедения и физики металлов». – М.: Металлургиздат, 1958. Вып. 5. С. 161 – 209.
13. Энтин Р.И. Превращения аустенита в стали. – М.: Металлургиздат, 1960. – 252 с.
14. Umamoto M., Horiuchi K., Tamura I. // Trans. ISIJ. 1982. Vol. 22. P. 854 – 861.
15. Шур Е.А. Повреждения рельсов. – М.: Транспорт, 1971. – 112 с.
16. Раузин Я.Р., Шур Е.А. Конструктивная прочность рельсов. – М.: Машиностроение, 1975. – 58 с.

© 2012 г. Ю.А. Самойлович
Поступила 5 октября 2011 г.