

Тепловое и термонапряженное состояние железнодорожных колес при локальной поверхностной закалке

Б. С. Карпинос^а, В. Г. Барило^а, С. В. Петров^б, А. Г. Сааков^б,
Л. И. Маркашова^в, М. Л. Валевиц^в, В. П. Дроговоз^г, Н. Г. Соловьева^а,
В. В. Задорожный^а

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б НПП “ТОПАС”, Киев, Украина

^в Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

^г Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, Украина

Исследовано тепловое и термонапряженное состояние бандажа железнодорожного колеса при локальной поверхностной закалке. Для различных точек сечения бандажа изучены закономерности изменения во времени температур, термических напряжений, деформаций и их скоростей, а также отношений главных напряжений. Установлено, что закаливаемый материал подвергается знакопеременному упругопластическому деформированию. Проанализировано влияние расположения плазматрона на уровни температур и термических напряжений.

Ключевые слова: закалка, температура, термические напряжения, теплопроводность, термоупругость, термопластичность.

Обозначения

a	– коэффициент температуропроводности
E	– модуль упругости
μ	– коэффициент Пуассона
T	– температура
α_T	– коэффициент линейного термического расширения
α^*	– коэффициент теплообмена
λ	– коэффициент теплопроводности
ε, σ	– термические деформации и напряжения
$\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z, \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$	– компоненты термических деформаций и напряжений: соответственно радиальные, окружные, осевые
ε_i, σ_i	– интенсивность деформаций и напряжений, $\varepsilon_i = \frac{1}{(1+\mu)\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2},$ $\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2}$
r, z	– цилиндрические координаты
t	– время

Постановка задачи. Установлено, что при эксплуатации железнодорожных колес в ободу через некоторое время вначале возникает сетка трещин, а затем несколько магистральных (рис. 1), что приводит к аварийной ситуации. В настоящее время отсутствует однозначная объективная оценка причин и времени появления трещин.

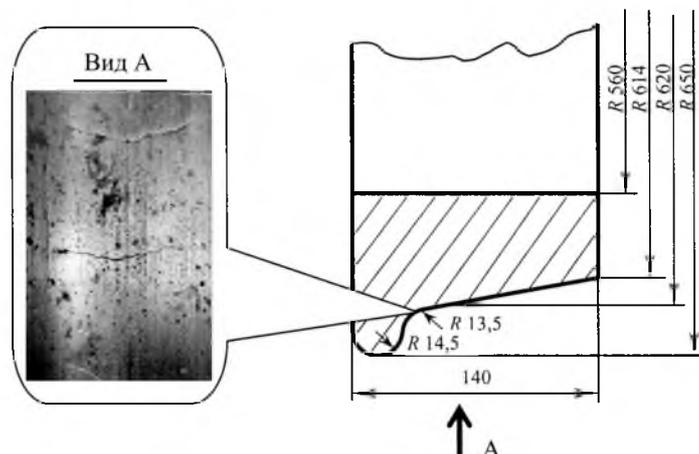


Рис. 1. Бандаж железнодорожного колеса.

Для выяснения возможных причин образования трещин и обоснования их дальнейшего поведения необходима информация о напряженно-деформированном состоянии колеса в процессе его термообработки. Экспериментально показано, что в зависимости от режима закалки колеса, объема закаливаемого материала и его расположения трещины могут либо появляться, либо отсутствовать [1].

В работе исследовалось тепловое и термонапряженное состояние бандажа железнодорожного локомотивного колеса в процессе локальной закалки. С целью оценки остаточных полей напряжений и деформаций особое внимание уделялось состоянию материала при нагреве в момент достижения максимальных температур и максимальных термических напряжений, а также при полном охлаждении колеса.

Исходные данные. Для решения краевых задач термоупругости и термопластичности необходимо располагать данными о форме и размерах детали, о механических (модуль упругости, пределы текучести и прочности, предельная деформативность) и теплофизических (коэффициенты линейного и объемного расширения, теплоемкость и теплопроводность) свойствах материала, а также начальными и граничными условиями нагружения. Объективность получаемых результатов расчетов зависит от достоверности этих сведений, возможности учета влияния на характер связи между напряжениями и деформациями величины деформаций, температуры материала, наличия в нем структурных и фазовых превращений. Естественно, что получить такой объем информации затруднительно.

Поэтому на практике при решении задач часто используют средние значения характеристик. При необходимости выполняется численный эксперимент, когда та или иная характеристика принимает ряд возможных значе-

ний. При этом обязательно следует учитывать, что механические и теплофизические характеристики связаны между собой термодинамическими соотношениями. Например, желание учесть температурную зависимость модуля упругости при отсутствии таковой для других характеристик может привести не к повышению, а наоборот, к снижению достоверности результатов расчетов.

Бандаж железнодорожного локомотивного колеса представляет собой осесимметричное полая тело, внешняя поверхность которого изготавливается по специальному профилю, что обеспечивает необходимый контакт с рельсом. Бандаж, нагретый до температуры $T = 250...300^\circ\text{C}$, по скользящей посадке устанавливается на колесную пару. Это приводит к формированию в нем после охлаждения полей остаточных растягивающих напряжений.

Профиль бандажа и его геометрические размеры приведены на рис. 1. Закалка материала поверхностных слоев происходит в результате оттока теплоты от поверхности в глубь бандажа после интенсивного локального нагрева. Колесо при закалке вращается с заданной скоростью. При этом нагретые до высокой температуры поверхностные слои выходят из зоны теплового воздействия и охлаждаются за счет теплопроводности материала и естественной конвекции. В качестве термического источника используется плазмотрон, генерирующий ионизированный высокоэнтальпийный поток. Передача теплоты от плазмы к бандажу представляет собой сложный термодинамический процесс, который характеризуется наличием одновременно тепло-, массообменных и химических процессов на поверхности и в глубине материала. Отметим также нестационарность процесса и его локализацию (неоднородность). Все это усложняет корректное аналитическое задание граничных условий теплообмена при решении задач нестационарной теплопроводности и напряженно-деформированного состояния. Поэтому основное внимание уделялось результатам экспериментального термометрирования бандажа в процессе закалки. Величина коэффициента теплообмена, температура среды, а также закономерности изменения их во времени и продолжительность теплового воздействия (рис. 2) подбирались таким образом, чтобы в реперных точках бандажа экспериментальные [1] и получаемые расчетные кинетики температур совпадали с принятой погрешностью 2%.

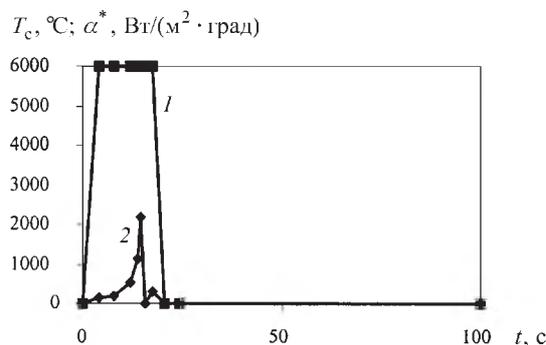


Рис. 2. Изменение граничных условий теплообмена во времени при моделировании процесса закалки бандажа колеса: 1 – температура плазмы T_c ; 2 – коэффициент теплообмена между плазмой и поверхностью бандажа α^* .

Время нагрева t принималось равным 14,6 с. В течение этого времени коэффициент теплообмена возрастал по закону параболы, температура первоначально изменялась линейно, а затем принималась постоянной. Наиболее интенсивный теплообмен имел место в конце нагрева. После нагрева происходило резкое уменьшение теплообмена и температуры. В течение последующих 84 с задавались граничные условия естественной конвекции и температура, равная температуре окружающей среды. На практике в зависимости от состояния поверхностных слоев бандажа, необходимых условий и целей закалки реализуются различные варианты расположения оси плазмотрона относительно сечения бандажа. Приведенные на рис. 3 варианты расположения плазмотрона приняты основными, для них выполнены соответствующие расчеты.

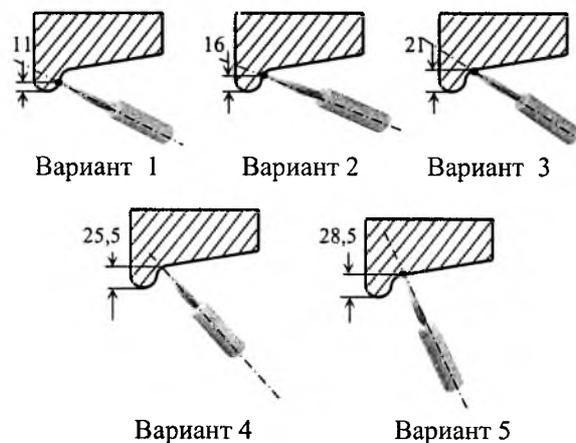


Рис. 3. Основные варианты расположения плазмотрона относительно бандажа.

Бандаж изготовлялся из малолегированной стали 60 [2] следующего химсостава, %: 0,57...0,65 C; 0,17...0,37 Si; 0,5...0,80 Mn; 0,040 P; 0,040 S; 0,25 Cr. Механические (модуль упругости E , кривые деформирования $\sigma = f(\varepsilon)$) и теплофизические (коэффициент линейного расширения α_T , теплоемкость c_p и теплопроводность λ) характеристики исследуемой стали представлены на рис. 4, где точки – экспериментальные данные, штриховые линии – их аппроксимация.

Программа расчета теплового и напряженно-деформированного состояний позволяла учитывать зависимость механических и теплофизических характеристик стали от температуры в виде полинома второй степени. Кривые деформирования состоят из двух участков: упругого и пластического деформирования. В таблице приведены уравнения линий регрессий в интервале изменения температуры $0 < T < 1500^\circ\text{C}$ и достоверность аппроксимации Δ^2 .

Методика расчета. Для расчета напряженно-деформированного состояния использовался один из наиболее перспективных методов решения задач механики твердого деформируемого тела – метод конечных элементов, основанный на теории смягченно-смешанных аппроксимаций. Абсолютно устойчивая экономная схема расщепления в сочетании с алгоритмом экстраполя-

ции Ричардсона позволила достигнуть заданной точности решения. Все этапы решения автоматизированы от генерации сетки до отображения расчетной схемы и результатов расчета [3].

Уравнения регрессий зависимостей механических и теплофизических характеристик от температуры

Характеристика	Уравнение регрессии	Достоверность аппроксимации Δ^2
E	$E = (4 \cdot 10^{-7} T^2 - 0,0022T + 2,1652) \cdot 10^{11}$ Па	0,9073
α_T	$\alpha_T = (4 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,0007T + 1,0148) \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$	0,9805
λ	$\lambda = (5 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0195T + 43,696)$ Вт/(м·град)	0,9300
c_p	$c_p = (9 \cdot 10^{-5} T^2 + 0,3101T + 90,62)$ Дж/(кг·град)	1,0000

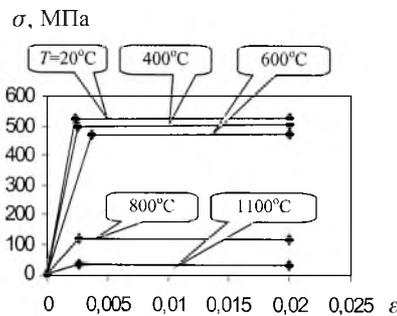
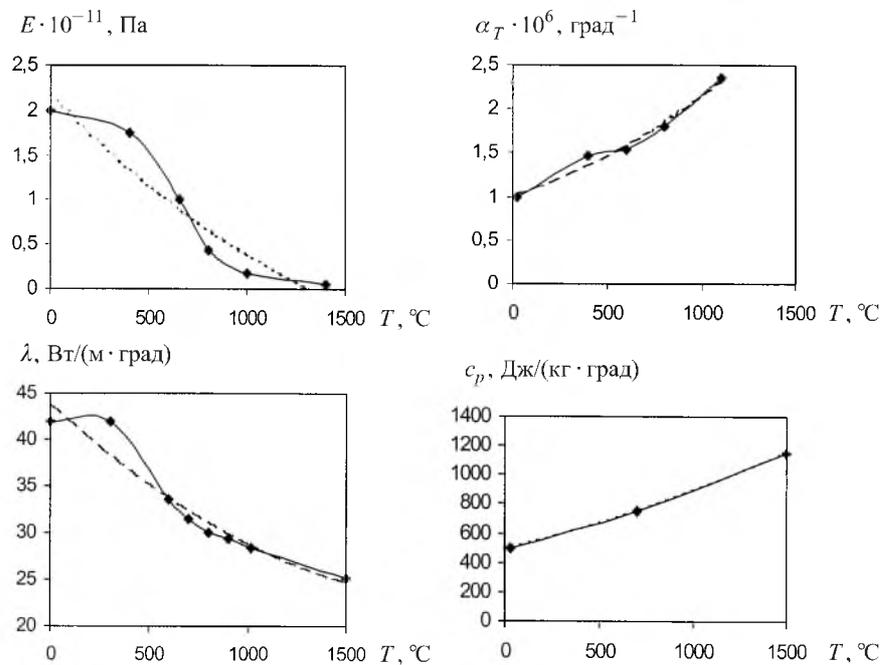


Рис. 4. Зависимости физических характеристик стали от температуры.

В общей постановке задача теплового и напряженно-деформированного состояний банджа является трехмерной. Однако, учитывая локальный характер теплового воздействия, ее можно рассматривать как осесимметричную двухмерную, что намного упрощает ее решение. Это аргументируется тем, что тепловой поток принимается не сконцентрированным в подвижном пятне, а распределенным по части поверхности контура обода. Уравнение нестационарной теплопроводности принято в виде

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}.$$

Для расчета напряженно-деформированного состояния использовались известные соотношения между деформациями $\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \varepsilon_{rz}$ и перемещениями u и v :

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right);$$

закон Гука:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu-2\mu^2} [(1-\mu)\varepsilon_r + \mu(\varepsilon_\theta + \varepsilon_z) - \alpha_T T], \\ \sigma_z &= \frac{E}{1-\mu-2\mu^2} [(1-\mu)\varepsilon_z + \mu(\varepsilon_\theta + \varepsilon_r) - \alpha_T T], \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\mu-2\mu^2} [(1-\mu)\varepsilon_\theta + \mu(\varepsilon_z + \varepsilon_r) - \alpha_T T], \\ \sigma_{rz} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \varepsilon_{rz}; \end{aligned}$$

уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{ry}}{\partial r} + \frac{\sigma_{ry}}{r} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned}$$

и совместности деформаций

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_r}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial r^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{rz}}{\partial r \partial z}, \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_\theta}{\partial r^2} &= \frac{1}{r} \frac{\partial(\varepsilon_r - 2\varepsilon_\theta)}{\partial r}, \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_\theta}{\partial z^2} &= \frac{1}{r} \frac{\partial(2\varepsilon_{rz} - \varepsilon_z)}{\partial r}, \end{aligned}$$

$$\frac{\varepsilon_{\theta}}{r} + \frac{\partial \varepsilon_{\theta}}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial z}.$$

При решении задачи термопластичности использовался метод дополнительных деформаций.

Предварительно решалась тестовая задача нестационарной теплопроводности для бесконечного цилиндра – тела, для которого известно точное аналитическое решение уравнения нестационарной теплопроводности при соответствующих граничных условиях теплообмена. Решение задачи без учета зависимости теплофизических характеристик от температуры имеет следующий вид [4]:

$$\theta(\bar{r}, Fo) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n I_0(\bar{r} \mu_n) \exp(-\mu_n^2 Fo),$$

где θ – относительная температура; $\theta(\bar{r}, Fo) = \frac{T(r, t) - T_0}{T_c - T_0}$; $T(r, t)$ – текущее значение температуры; T_0 – начальное значение температуры цилиндра; T_c – температура среды; μ_n – корни характеристического трансцендентного уравнения $\frac{I_0(\mu_n)}{I_1(\mu_n)} = \frac{\mu_n}{Bi}$; A_n – тепловые амплитуды,

$$A_n = (-1)^{n+1} \frac{2Bi \sqrt{Bi^2 + \mu_n^2}}{\mu_n + (Bi^2 + Bi + \mu_n^2)};$$

$\bar{r} = r/R$ – относительный радиус; R – радиус цилиндра; $Bi = \alpha^* R/\lambda$ – критерий Био (относительная интенсивность нагрева или охлаждения); $Fo = at/R^2$ – критерий Фурье (относительное время нагрева или охлаждения). Бесконечный ряд в решении уравнения нестационарной теплопроводности имеет быструю и хорошую сходимость.

Погрешность расчета температуры зависит от времени и текущей координаты. В начальный момент теплового воздействия на поверхности тела она максимальна. С целью обеспечения не более 2% погрешности расчета температуры на поверхности цилиндра учитывались значения пяти сотен корней. Для времени, равного времени нагрева при закалке обода колеса ($Fo = 1,18 \cdot 10^{-5}$), использование такого количества корней обеспечивало погрешность результатов расчета менее 0,01%. Сопоставление данных аналитического и численного расчетов по различным методикам показало удовлетворительное их совпадение. Максимальное отличие результатов не превышало 1,5%.

Цилиндр разбивался на 780 треугольных элементов, соединенных в 440 узлах. Оптимальная разбивка сечения на треугольные конечные элементы достигалась на основании анализа нескольких вариантов сетки разбивки, отличающихся количеством подобластей и линий в контуре каждой под-

области, а также числом узлов и неравномерностью сгущения узлов на каждой линии. В качестве параметров оптимизации использовали минимальный угол треугольного элемента, общее количество элементов и наличие вынужденных аномальных сгущений узлов. На рис. 5 приведена оптимальная разбивка сечения и его фрагментов. Сечение бандажа колеса разбивалось на 657 конечных элементов, соединенных в 365 узлах.

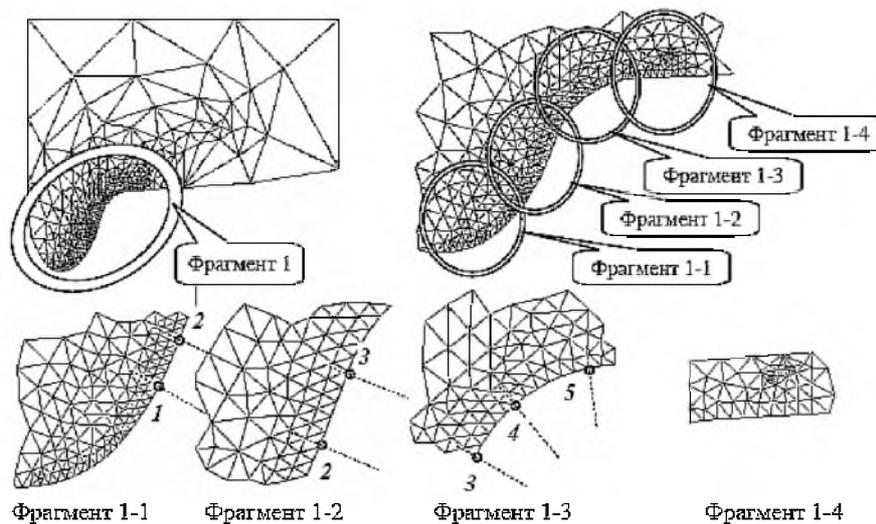


Рис. 5. Разбивка сечения бандажа колеса на конечные элементы.

Данная сетка использовалась при решении уравнений нестационарной теплопроводности, термоупругости и термопластичности для всех вариантов механических граничных условий и граничных условий теплообмена. На рис. 5 точками 1–5 обозначено пересечение оси плазматрона с поверхностью бандажа (варианты 1–5). Расстояние между этими точками составляло 5 мм. Дополнительно акцентировалось внимание на точках, расположенных на расстоянии 5 мм от крайних положений оси плазматрона.

Программа предусматривала стандартные этапы решения задачи напряженно-деформированного состояния тела в конечноэлементной постановке, а именно: определение матрицы жесткости каждого элемента, глобальной матрицы жесткости, главных векторов сил и перемещений, а затем напряжений, деформаций и перемещений каждого элемента. При неупругом деформировании использовались экспериментальные данные о деформировании стали при статическом одноосном нагружении в условиях различных температур.

Анализ результатов расчета теплового, напряженного и деформированного состояний. В процессе нагрева изменение температуры отмечается в небольшой приповерхностной области бандажа на глубине 5–6 мм, т.е. имеет место существенная неоднородность полей температур. При изменении положения оси плазматрона максимальное значение температуры изменяется. Так, по мере удаления от гребня она понижается от 1048°C (вариант 1) до 914°C (вариант 4), а затем незначительно повышается до 920°C (вариант 5).

Материал бандажа находится в условиях сложного напряженного неоднородного состояния. В исходном состоянии за счет натяга происходит пластическое деформирование материала, уровень напряжений в начальный момент времени незначительно превышает предел текучести, в то время как уровень напряжений вблизи центра нагрева имеет меньшие значения по сравнению с периферией нагрева, что обусловлено уменьшением механических характеристик при высоких температурах. Поэтому максимальные напряжения наблюдаются не в центре нагрева, а на некотором расстоянии от него. Различие между величинами напряжений для разных вариантов расположения оси плазмотрона незначительное (около 5%).

В отличие от напряженного состояния максимум деформаций совпадает с максимумом температур, т.е. находится в центре нагрева. Для различных вариантов расположения оси плазмотрона деформации, как и напряжения, отличаются незначительно. При этом можно отметить следующую закономерность. По мере удаления оси плазмотрона от гребня деформации уменьшаются на 13% (1–4 варианты) и затем увеличиваются на 18% (4, 5 варианты).

Сопоставление результатов расчета напряженного состояния бандажа без натяга и с натягом показало, что натяг приводит к росту и смене знака окружных напряжений. В момент достижения максимальной температуры на поверхности бандажа напряжения увеличиваются с $\sigma_{\theta} = -139$ МПа (без натяга) до $\sigma_{\theta} = 393$ МПа (с натягом). При этом интенсивность напряжений изменяется незначительно, возрастая примерно на 2%, в то время как интенсивность деформаций и пластическая деформация уменьшаются приблизительно на 10%.

После охлаждения в колесе возникают остаточные напряжения и деформации. Температурное поле практически однородное. Интенсивность напряжений превышает предел текучести материала, а пластические деформации $\varepsilon = 0,0015$. Материал находится в условиях трехосного растяжения при отношении главных напряжений 1...5. Размеры наиболее напряженной области бандажа соответствуют области термического воздействия. Зона пластического деформирования материала распространяется от поверхности бандажа на глубину 5–6 мм. Максимальные пластические деформации отмечаются на поверхности бандажа в области непосредственного воздействия на него струи плазмотрона.

Рассмотрим подробнее изменение температур, напряжений и деформаций для варианта 2 расположения оси плазмотрона (рис. 6). Как показала практика, при таком варианте закалки возможно появление трещин в бандаже.

В момент окончания нагрева для материала характерны экстремальные значения термодинамических параметров состояния: температура на поверхности достигает $T = 1019^{\circ}\text{C}$, окружные напряжения $\sigma_{\theta} = -120$ МПа, пластические деформации $\varepsilon = 0,0236$. При таких деформациях в пластичных материалах не могут появиться трещины. Однако если в результате закалки характеристика пластичности материала ψ существенно уменьшится до 0,02...0,03, то возникновение трещин вполне вероятно.

Интенсивность полных деформаций в начале нагрева уменьшается до определенного минимума вследствие наложения сжимающих термических деформаций на растягивающие деформации натяга, затем возрастает до максимума и с началом охлаждения снова уменьшается. Время достижения максимальных и минимальных значений деформаций и их величина с ростом глубины монотонно уменьшаются. Так, на наружной поверхности бандажа минимальное значение достигается на 8-й секунде нагрева, а на глубине 5 мм – после начала охлаждения. Время достижения максимума интенсивности полных деформаций на поверхности практически совпадает с началом охлаждения, в то время как на глубине оно отмечается значительно позже. На поверхности интенсивность полных деформаций уменьшается примерно на 30%, на глубине 5 мм – более чем на порядок. Максимальное значение на поверхности более чем на два порядка выше, чем на глубине 5 мм.

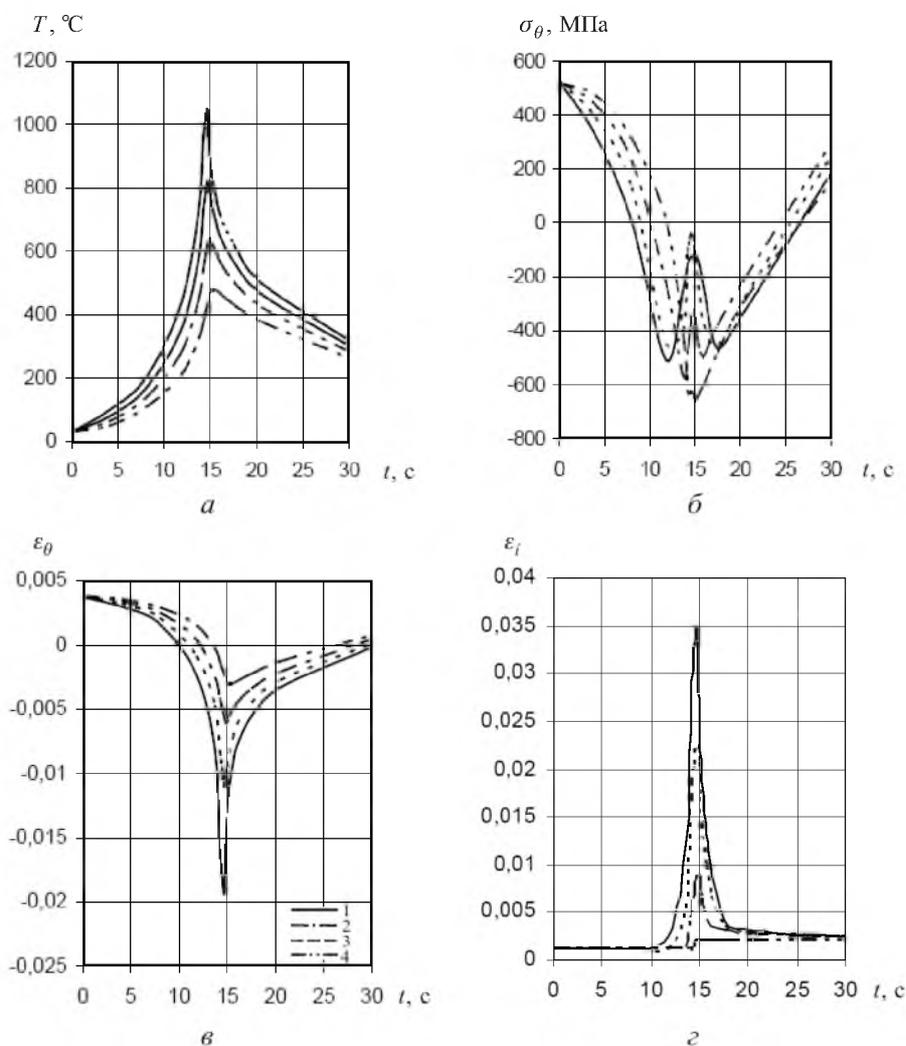


Рис. 6. Изменение в процессе закалки температуры (а), термических напряжений (б) и деформаций (в, г) в различных точках бандажа. (Здесь и на рис. 7: 1 – на поверхности; 2, 3, 4 – на глубине 1, 2 и 4 мм соответственно.)

Величина шарового тензора напряжений достигает максимума несколько раньше максимума температур, в то время как величина шарового тензора деформаций на поверхности банджа достигает максимума сжатия в момент максимума температур. На глубине 1 мм в этот момент наблюдается минимум сжимающих напряжений (по абсолютному значению) вследствие роста с глубиной растягивающих деформаций, нормальных к выпуклой поверхности, т.е. выпучивания наружу прогретого слоя из-за его сжатия. На глубине 2 мм кратковременный интенсивный нагрев оказывает уже значительно меньшее влияние на величину деформаций, чем более длительный, но менее интенсивный предварительный прогрев. Поэтому максимум деформаций здесь проявляется раньше максимума температур. На глубине 5 мм имеет место весьма существенное запаздывание процессов нагрева и деформирования материала по сравнению с таковыми на поверхности.

На структурные превращения в процессе теплового воздействия большое влияние оказывают как температура, так и скорость ее изменения, а также величина шарового тензора напряжений. Наибольшие скорости изменения температуры отмечаются на поверхности банджа в конце нагрева и в начале охлаждения, т.е. в момент достижения максимальной температуры. Приведенные на рис. 7 данные позволяют сделать предварительное заключение о степени завершенности закалочных процессов и глубине слоя закалки.

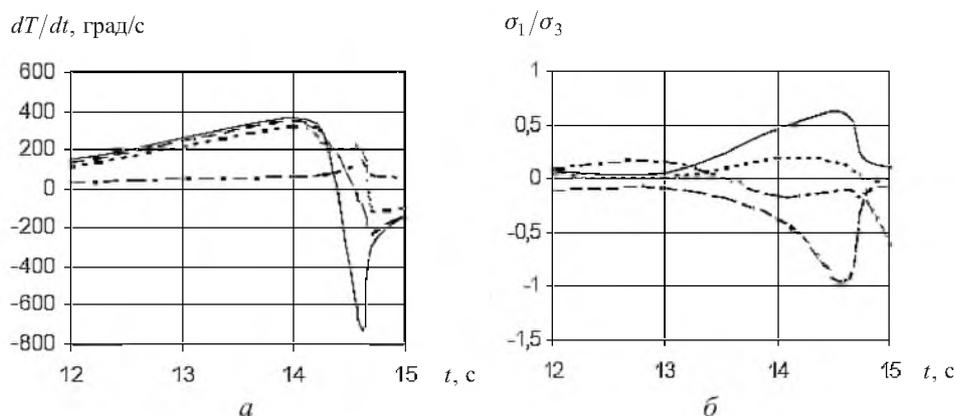


Рис. 7. Изменение во времени скорости температуры dT/dt (а) и отношения главных напряжений σ_1/σ_3 в различных точках банджа (б).

Слой материала толщиной 1 мм является наиболее благоприятным местом для закалки.

Выводы

1. Положение плазмотрона относительно банджа при закалке не оказывает существенного влияния на уровень максимальных термических напряжений и деформаций.

2. В процессе закалки банджа отмечается знакопеременное упруго-пластическое деформирование материала. Бандаж находится в условиях

квазиравноосного напряженного состояния. Причиной охрупчивания материала и, как следствие, появления трещин могут служить уровни температур, значения компонент термических напряжений и их скоростей.

Резюме

Досліджено тепловий та термонапружений стан бандажа залізничного колеса при його місцевому поверхневому гартуванні. Для різних точок перерізу бандажа вивчено закономірності зміни у часі температур, термічних напружень, деформацій та їх швидкостей, а також відношення головних напружень. Установлено, що матеріал, який загартовується, піддається знакозмінному пружно-пластичному деформуванню. Проаналізовано вплив розташування плазмотрона на рівні температур і термічних напружень.

1. *Петров С. В., Сааков А. Г.* Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. – Киев: ТОПАС, 2000. – 218 с.
2. *Журавлев В. Н., Николаева О. И.* Машиностроительные сплавы. Справочник. – М.: Машиностроение, 1981. – 340 с.
3. *Ковальчук Б. И., Лебедев А. А., Уманский С. Э.* Механика неупругого деформирования материалов и элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1987. – 278 с.
4. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.

Поступила 27. 12. 2002