

МАШИНА ЖАСАУ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2023_2_106

MPHTI 55.13.17

А.Т. Канаев¹, А.Е. Молдахметова¹, Е.Ю. Ремшев³¹АО «Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, Казахстан

E-mail: aman-kanaev2012@yandex.ru

E-mail: aliya-981@mail.ru*

²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: remshev@mail.ru

**ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБОДЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС
МЕХАНИЧЕСКИМ МЕТОДОМ****ТЕМІРЖОЛ ДОҒАЛАҚТАРЫНЫҢ ЖИЕГІНДЕГІ ҚАЛДЫҚ КЕРНЕУЛЕРДІ
МЕХАНИКАЛЫҚ ӘДІСПЕН БАҒАЛАУ****EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES IN THE RIM OF RAILWAY WHEELS BY
MECHANICAL METHOD**

Аннотация. Проведена численная оценка величины и характера распределения внутренних остаточных напряжений в поверхностном слое плазменно-закаленного обода железнодорожного колеса механическим (разрушающим) методом. Распределение остаточных напряжений оценено по величине упругих деформаций. Показано, что плазменно-закаленный обод железнодорожного колеса характеризуется сжимающими остаточными напряжениями интенсивностью 9,0...48,2 кг/мм² в поверхностной зоне с переходом в остаточные растягивающие напряжения интенсивностью 8,8...44,1 кг/мм² в подповерхностной зоне.

Отмечено, что сравнительная оценка остаточных напряжений в плазменно-упрочненном образце механическим и рентгенографическим методами показывает применимость разрушающего метода определения величины и характера распределения внутренних остаточных напряжений, основанного на измерении величины упругих деформаций. Совместное применение механического и рентгеновского методов позволит повысить точность определения остаточных напряжений в плазменно-упрочненной поверхности тяжело нагруженных и быстроизнашивающихся деталей.

Ключевые слова: остаточные напряжения, железнодорожное колесо, обод, плазменная закалка, скорость охлаждения, градиент температуры, фазовые превращения, конструкционная прочность.

Аңдатпа. Механикалық (деструктивті) әдіспен темір жол доңғалағының плазмамен шыңдалған жиегінің беткі қабатындағы ішкі қалдық кернеулердің таралу шамасы мен сипатына сандық бағалау жүргізілді. Қалдық кернеулердің таралуы серпімді деформациялардың шамасы бойынша бағаланады. Теміржол доңғалақтарының плазмалық шынықтыру жиегі 8,8...44,1 кг/мм² интенсивтілігі бар қалдық созылу кернеулеріне ауысумен беттік аймақта 9,0...48,2 кг/мм² интенсивтілігі бар қысу қалдық кернеулерімен сипатталатыны көрсетілген.

Плазмада шыңдалған үлгідегі қалдық кернеулерді механикалық және рентгендік әдістермен салыстырмалы бағалау серпімділік шамасын өлшеуге негізделген ішкі қалдық кернеулердің таралу шамасы мен сипатын анықтау үшін деструктивті әдісті қолдану мүмкіндігін көрсететіні атап өтілген. Механикалық және рентгендік әдістерді біріктіріп қолдану қатты жүктелген және

тозуы жоғары бөлшектердің плазмамен шыңдалған бетіндегі қалдық кернеулерді анықтаудың дәлдігін арттырады.

Түйін сөздер: қалдық кернеулер, темір жол дәңгелегі, жиек, плазмалық шынықтыру, салқындау жыламдығы, температура градиенті, фазалық түрлендірулер, құрылымдық беріктік.

Abstract. Numerical evaluation of the magnitude and nature of the distribution of internal residual stresses in the surface layer of the plasma-hardened rim of a railway wheel by a mechanical (destructive) method has been carried out. The distribution of residual stresses is estimated from the magnitude of elastic deformations. It is shown that the plasma-hardened rim of a railway wheel is characterized by compressive residual stresses with an intensity of 9.0...48.2 kg/mm² in the surface zone with a transition to residual tensile stresses with an intensity of 8.8...44.1 kg/mm² in the subsurface zone.

It is noted that a comparative assessment of residual stresses in a plasma-hardened sample by mechanical and X-ray methods shows the applicability of a destructive method for determining the magnitude and nature of the distribution of internal residual stresses based on measuring the magnitude of elastic deformations. The combined use of mechanical and X-ray methods will improve the accuracy of determining residual stresses in the plasma-hardened surface of heavily loaded and high-wear parts.

Keywords: residual stresses, railway wheel, rim, plasma hardening, cooling rate, temperature gradient, phase transformations, structural strength.

Введение. Анализ выполненных в последние годы работ показывает, что исследованию влияния скорости охлаждения при термической обработке на термонапряженное состояние упрочняемых деталей обращается явно недостаточное внимание. Между тем эта проблема является одной из наиболее важных, поскольку долговечность деталей и изделий зависит от их внутреннего напряженного состояния после различных технологических обработок, приводящих к формированию внутренних остаточных напряжений [1,2].

Общеизвестно, что причинами возникновения остаточных напряжений при термической обработке являются неодновременность изменения температуры по сечению обрабатываемых изделий наряду с неоднородностью протекания фазовых ($\alpha \rightarrow \gamma$) превращений в стали, сопровождающихся разным изменением удельного объема в различных точках обрабатываемого тела. Удельный объем меняется при термическом сжатии и расширении, фазовых и структурных превращениях, изменении химического состава поверхностных слоев стали. Если бы термическое сжатие и расширение, фазовые и структурные превращения проходили одновременно и в одинаковой степени по всему объему тела, то не было бы оснований для возникновения внутренних напряжений. Однако при нагреве и охлаждении всегда имеется градиент температур по сечению тела, поэтому указанные выше изменения удельного объема в разных точках металла протекают неодинаково, что приводит к возникновению внутренних напряжений. При поверхностной плазменной закалке из-за высоких скоростей охлаждения (по большинству оценок $\sim 700 \dots 1000$ °C/с) возникают большие градиенты температур, что приводит к разным изменениям удельного объема фазовых составляющих стали (аустенита, мартенсита) в разных точках поверхностного слоя и появлению остаточных напряжений [3].

Материал и методика выполнения работы. Ввиду больших трудностей подсчета напряжений в таких телах сложной формы, какими являются железнодорожные колеса, принята методика оценки величины и характера распределения остаточных напряжений механическим (разрушающим) методом.

Плазменной закалке подвергались колеса, изготовленные из стали марки 2 в соответствии с требованиями ГОСТ 398-2010. Эта сталь является аналогом конструкционной стали 60, содержащей повышенное содержание (0,57...0,65 %) углерода, которое обеспечивает ее износостойкость и контактную выносливость.

Режим поверхностной плазменной закалки колес на установке УДГЗ-200 принят следующий:

ток электрической дуги, А

275;

напряжение дуги, В	120;
номинальная мощность дуги, кВт	35;
расход защитного газа (аргона), л/мин	3-6;
частота вращения колесной пары, об/мин	0,143.

Оценку величины и характера распределения внутренних остаточных напряжений в плазменно-закаленной детали выполняли механическим методом. Распределение остаточных напряжений оценивалось по величине упругих деформаций. Заметим, что такая оценка не является строгой, поскольку основана на ряде допущений и упрощений. В частности, исходя из литературных источников, принято, что максимальное значение остаточных напряжений составляет $\sim 0,25 \dots 0,30$ % от величины полных внутренних напряжений. Кроме того, остаточное напряжение в спиленном слое можно оценить по расчету величины силы, вызвавшей упругую деформацию, хотя такой способ применяется, в основном, для тонких прокатанных полос [4,5]. Тем не менее, значение приведенной методики заключается прежде всего в качественной и полуколичественной оценке распределения внутренних остаточных напряжений в поверхностной зоне плазменно-закаленной стали.

Для измерения упругих деформаций из поверхностного слоя обода плазменно-закаленного железнодорожного колеса путем огневой резки вырезали сегмент длиной 145 мм и шириной 130 мм (рис.1). Из вырезанного сегмента (исключая зону термического влияния) приготовлен опытный образец (2x60x120) с использованием отрезного станка Iso Met 4000 «Buehler» (Германия), который вследствие обильного охлаждения в процессе удаления (спиливания) слоев предотвращает возможность возникновения новых остаточных напряжений. Кроме того, учитывалось (в целях исключения концевой эффекта), чтобы длина образца не менее чем в 7 раз превышала его толщину, несколько искажающие существовавшее ранее напряженное состояние.

Торцы образца подгоняли точно под 90 градусов к краям, далее вдоль образца проводили осевую линию, по которой измеряли длину образца в течение всего эксперимента. Приготовленный таким образом образец спиливали с обеих краев по 1 мм симметрично с двух сторон. До и после спиливания длину образца тщательно измеряли с точностью 0,05 мм, принятой для нониуса штангенциркуля, ширину образца измеряли микрометром.

Знак внутренних напряжений определяли по изменению длины образца. Если длина образца увеличилась, значит удалены слои металла, в которых действовали внутренние растягивающие напряжения. Уменьшение длины образца является показателем того, что спилены слои металла, в которых действовали внутренние сжимающие напряжения.

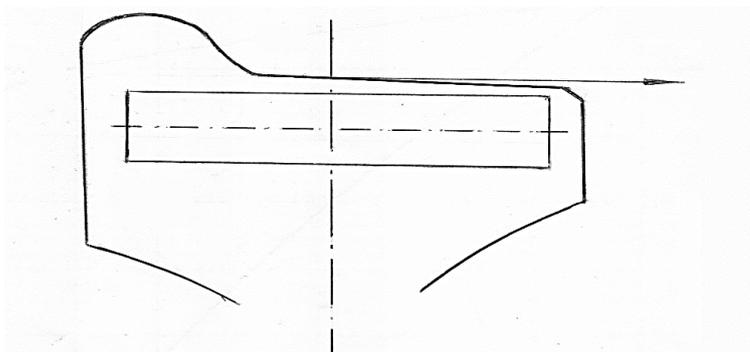


Рисунок 1. Схема вырезки образца из обода колеса

Величину внутренних напряжений определяли в следующем порядке:

– измерена длина образца до спиливания кромок, а затем после каждого спиливания (табл. 1, гр. 4);

– по разности длин образца до и после спиливания определена величина Δl (гр. 5);

– внутренние напряжения в образце рассчитано по известной формуле:

$$\sigma = E * \Delta l / l = - +, \quad (1)$$

где E – модуль упругости стали, кг/мм² (для стали $E = 21\,000$ кг/мм²);

– принято, что максимальная величина остаточных напряжений (по анализу литературных данных) составляет $\sim 0,25 \dots 0,30$ от величины внутренних напряжений (гр. 7);

– по результатам подсчетов сформулировано заключение о характере распределения внутренних напряжений в поверхностном слое образца (гр. 8).

Таблица 1. Количественная оценка величины остаточных напряжений и характер их распределений в упрочненном слое обода бандажа

Операции	h, мм	в, мм	L, мм	ΔL , мм	σ , кг/мм ²	$\sigma_{ост}$, кг/мм ²	Характер распределения ост. напряжений
1	2	3	4	5	6	7	8
До удаления	2	60	120	-	-	-	
После удаления							
1-го	#	58	119,5	-0,50	-87,9	-22,0	Остаточные сжимающие напряже- ния $\Sigma (-159,2)$
2-го	#	56	118,7	-0,80	-141,5	-35,4	
3-го	#	54	117,7	-1,00	-178,4	-44,6	
4-го	#	52	116,8	-0,90	-162,8	-48,2	
5-го	#	50	116,6	-0,20	-36,0	-9,0	
6-го	#	48	117,2	+0,6	+107,5	+26,9	Остаточные растягивающие напряжения $\Sigma (+150,5)$
7-го	#	46	118,1	+0,9	+160,0	+40,0	
8-го	#	44	119,1	+1,0	+176,3	+44,1	
9-го	#	42	119,8	+0,7	+122,7	+30,7	
10-го	#	40	120,0	+0,2	+35,0	+8,80	

Полученные результаты и их обсуждение. Как известно, из всех фазовых составляющих стали наибольшим удельным объемом или наименьшей плотностью обладает мартенсит, а наиболее плотной упаковкой атомов в кристаллической решетке обладает аустенит, имеющий меньший удельный объем и, соответственно, большую плотность. Поэтому из-за разницы удельных объемов фазовых составляющих стали закалка на мартенсит приводит к увеличению линейных размеров (деформации) и созданию остаточных напряжений. Как показывает практика термической обработки, уменьшить линейные размеры при закалке можно за счет увеличения в структуре закаленной стали остаточного аустенита. При определенном соотношении мартенсита и остаточного аустенита деталь после закалки может не изменять первоначальных размеров.

Начальным моментом возникновения остаточных напряжений является температура перехода границы упругого и пластического состояния стали. Углеродистые стали ниже

температуры ~ 400 °С находятся в упругом состоянии, выше – в пластичном, а для легированных сталей температурной границей упруго-пластичного состояния являются $500\dots 600$ °С [2].

Как правило, остаточные напряжения (сжимающие и растягивающие) взаимно уравновешиваются внутри тела без участия внешних нагрузок.

В общем виде внутренние напряжения различаются величиной области, в которой они уравновешиваются. По этому признаку внутренние напряжения, как известно, условно делят на внутренние макро, микро и субмикроскопические напряжения. Внутренние макронапряжения уравновешиваются в макроскопической зоне изделия. Необходимо отметить, что наибольший интерес для практики представляет оценка и характер распределения, в основном, макронапряжений, а микронапряжения, уравновешивающиеся в микроскопическом объеме, т.е. в объеме отдельных зерен структуры металла, и субмикроскопические напряжения, уравновешивающиеся в пределах отдельных кристаллических решеток, в большинстве случаев не рассматриваются.

В металле с внутренними остаточными напряжениями существуют области упругих деформаций разного знака. Если разрезать или спилить с него поверхностный слой, то становится возможным упругое снятие макронапряжений и тем самым измерить величину упругой деформации.

Из рис. 2 видно, что в поверхностном (упрочненном) слое созданы остаточные сжимающие напряжения ($\sigma = 60\dots 50$ мм), переходящие далее в остаточные растягивающие ($\sigma = 48\dots 40$ мм), которые относительно центра экспериментальной полосы распределены симметрично; суммарные величины сжимающих и растягивающих напряжений составляют соответственно $-159,2$ кг/мм² и $+150,5$ кг/мм², и по величине они находятся в диапазоне $8,80\dots 48,2$ кг/мм².

Остаточные напряжения могут снижать или повышать конструкционную прочность изделия. Можно утверждать, что остаточные напряжения будут благоприятны в том случае, когда их направление противоположно направлению напряжений, возникающих в процессе эксплуатации изделия. Так, наличие сжимающих остаточных напряжений на поверхности тяжело нагруженных деталей повышает их усталостную прочность (трещиностойкость), и наоборот, наличие растягивающих остаточных напряжений снижает усталостную прочность. Это связано с тем, что при больших контактных и знакопеременных нагрузках изнашивание и трещины усталости на поверхности детали возникают под влиянием остаточных растягивающих напряжений. Остаточные сжимающие напряжения, формирующиеся на поверхности, уменьшают растягивающие напряжения от внешней нагрузки, что приводит к повышению износостойкости, усталостной прочности и сопротивления хрупкому разрушению материала [6, 7].

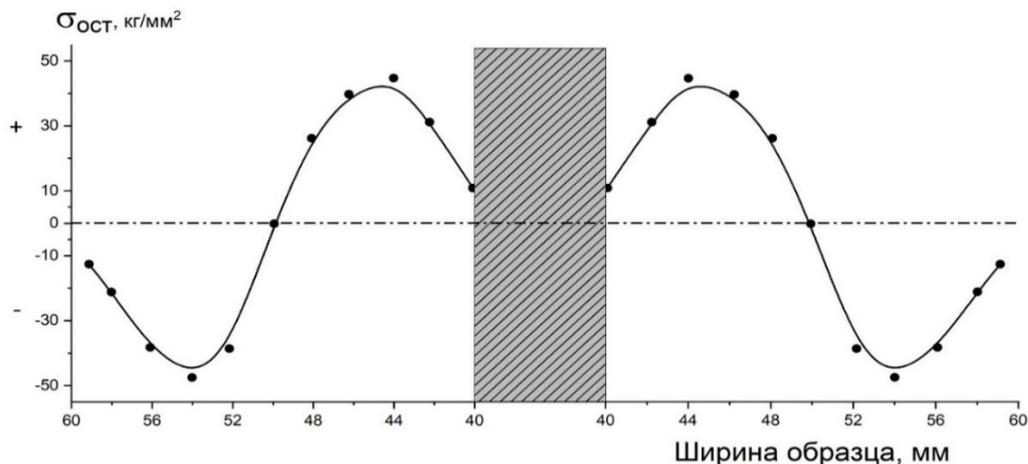


Рисунок 2. Характер распределения остаточных напряжений в плазменно-закаленном слое обода железнодорожного колеса

Важность создания сжимающих напряжений в поверхностном слое детали и изделия обоснована еще и тем, что процессы изнашивания, возникновения и роста трещин при динамических и знакопеременных нагрузках начинаются с поверхности, следовательно, определяются физико-механическими свойствами относительно тонкого поверхностного слоя, выполняющего важную роль в обеспечении надежности и долговечности машин и механизмов. Следует также отметить, что особенностью процессов изнашивания поверхностного слоя является то, что при изнашивании происходит непрерывное наложение циклов пластического деформирования и разрушения тонкого поверхностного слоя. Такой циклический характер этих процессов приводит к сложным структурным изменениям в поверхностном слое детали. Именно циклическостью изменений структуры объясняется высокая концентрация внутренних напряжений в металле. В результате структура поверхностного слоя может оказаться в процессе изнашивания совершенно иной, чем исходная структура металла в объеме. Эти особенности изнашивания поверхностного слоя привели к тому, что в последние годы наряду с традиционными способами упрочняющей термической обработки возникла и бурно развивается привлекательное и перспективное направление нетрадиционных методов обработки поверхности металлических материалов, основанных на закалке деталей и изделий плазменной струей. В процессе такой обработки формирование структуры и свойств материала происходит в его тонком поверхностном слое толщиной до 2...2,5 мм. Как показывает практика применения плазменной закали (без микроплавления поверхности), такая толщина достаточна для гарантированного повышения износостойкости детали в 2,0...2,5 раза. Именно поэтому представляет интерес исследование влияния характера распределения остаточных напряжений в поверхностном упрочненном слое.

Общеизвестно, что детали, подвергаемые в процессе знакопеременным нагрузкам, существенно подвергаются обработкам, с помощью которых можно создать на поверхности детали сжимающие остаточные напряжения. К ним можно отнести все виды поверхностной закали (закалка ТВЧ, лазерная и плазменная закали), разновидности химико-термической обработки (азотирование, нитроцементация и др.), поверхностную пластическую деформацию. Важно при этом знать не только величину остаточных напряжений на поверхности, но главным образом характер их распределения по сечению деталей.

Метод оценки внутренних остаточных напряжений, принятый в данной работе, дополняет рентгеновский способ оценки остаточных напряжений, основанный на изменении

межплоскостных расстояний в кристаллической решетке материала при упругой деформации. Как известно, суть рентгеновского метода определения остаточных напряжений состоит в определении упругих деформаций, возникающих под действием механических напряжений, которые вызывают изменения межплоскостных расстояний [8,9].

Из теории дифракции рентгеновских лучей следует, что если длина волны рентгеновского излучения λ и угол падения α удовлетворяют условию Вульфа-Брэгга:

$$n \lambda = 2 d \cos \alpha, \quad (2)$$

то падающие лучи отражаются, не проникая вглубь кристалла. (Здесь n – произвольное целое число, d – расстояние между двумя соседними атомными плоскостями кристаллической решетки).

Упругие деформаций под действием механических напряжений вызывают изменения межплоскостных расстояний в кристаллической решетке материала, в соответствии с изменением которых меняются углы дифракции рентгеновского излучения. Изменение угла дифракции приводит к смещению дифракционного пика на регистрируемой дифракционной картине относительно его положения при отсутствии напряжений. По этому смещению прямым образом определяется деформация и вычисляются механические напряжения. Однако следует отметить, что рентгеновский метод позволяет измерять остаточные напряжения только на поверхности, поскольку рентгеновские лучи проникают в металлическую поверхность на незначительную глубину [10].

Сравнительная оценка остаточных напряжений в термически упрочненном образце рентгенографическим и механическим методами показывает применимость механического (разрушающего) метода определения величины и характера распределения внутренних остаточных напряжений, основанного на измерении величины упругих деформаций [5, 11].

Такой же вывод определения остаточных напряжений подтверждается результатами по оценке характера распределения остаточных напряжений при использовании методики, основанной на измерениях величины упругих деформаций, возникающих при разрезке полосы [12, 13].

Заметим, что европейский стандарт EN 13262 содержит требования по обеспечению величины и характера распределения остаточных напряжений в ободе колеса по мере удаления от поверхности катания вглубь металла. По требованию этого стандарта на глубине 35 и 50 мм эти напряжения должны снизиться до нуля, что требует дальнейших исследований.

Выводы:

1. Отмечено, что формирование остаточных напряжений в упрочненном слое обода железнодорожного колеса происходит в результате одновременности изменения (градиента) температуры по сечению обрабатываемых изделий наряду с неоднородностью протекания фазовых превращений, сопровождающихся разным изменением удельного объема в различных точках обрабатываемого тела.

2. Проведена качественная и полуколичественная оценка величины и характера распределения внутренних остаточных напряжений в плазменно-закаленной детали механическим (разрушающим) методом. При этом расчет остаточных напряжений и характер их распределения проведены по измерению величины упругих деформаций. Установлено, что величина упругой деформации после разрезки во всех случаях оказалась незначительной – не превосходящей 1 мм.

3. Показано, что плазменно-закаленный обод железнодорожного колеса характеризуется сжимающими остаточными напряжениями интенсивностью 9,0...48,2 кг/мм² в по-

верхностной зоне с переходом в остаточные растягивающие напряжения интенсивностью $8,8 \dots 44,1 \text{ кг/мм}^2$ в подповерхностной зоне.

4. Сравнительная оценка остаточных напряжений в термически упрочненном образце механическим и рентгенографическим методами показывает применимость механического (разрушающего) метода определения величины и характера распределения внутренних остаточных напряжений, основанного на измерении величины упругих деформаций. Совместное применение механического и рентгеновского методов позволит повысить точность определения остаточных напряжений в плазменно-упрочненной поверхности детали.

Список литературы

1. Колбаско Н.И., Морганюк В.С., Лушчик Л.В. Исследование термонапряженного состояния стальных изделий в условиях интенсификации охлаждения при закалке // Кн. Термическая и термомеханическая обработка стали. – Москва, Металлургия, 1984. – с.26-31.
2. Башнин Ю.А., Ушаков Б.К., Секей А.Г. Технология термической обработки. – Москва: Металлургия, 1996. – 424 с.
3. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2006. – 180 с.
4. Стародубов К.Ф., Савенков В.Я., Поляков С.Н. Остаточные напряжения в колесах // Кн. Вопросы производства железнодорожных цельнокатаных колес. – Москва, Изд-во АН СССР, 1989. – С. 187-194.
5. Павлов И.М., Галлай Я.С., Астахов И.Г. Руководство к лабораторному практикуму по прокатке. – Москва: ГНТИ, 1967. – 253 с.
6. Данченко Н.И., Перков О.Н., Миронов П.Ф. и др. Конструкционная прочность термически упрочненных цельнокатаных колес // Кн. Термическая и термомеханическая обработка стали. – Москва: Металлургия, 1984. – С. 80-83.
7. Канаев А.Т., Сарсембаева Т.Е., Тополянский П.А. Исследование изменения внутренних напряжений в цельнокатаных железнодорожных колесах после поверхностной плазменной закалки // *Materialy X miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania swiatowej nauki-2019»*. – Volume 10. Techniczne nauki, Fizyka. – Przemysl, Nauka i Studia, 2019. – Str. 65-73.
8. Сухов А.В., Шиткин С.Л. Проблемы измерения остаточных напряжений в цельнокатаных колесах и других ответственных деталях тележек грузовых вагонов // Кн. Перспективные задачи развития железнодорожного транспорта. – Москва: Интекст, 2010. – С. 244-253.
9. Влияние плазменной обработки на напряженно-деформированное состояние гребней бандажа колес локомотивов / С.Н. Киселев, А.В. Саврухин, Г.Д. Кузьмина, А.С. Киселев // *Сварочное производство*. – 2001. – № 6. – С. 9-17.
10. Никулин С.А., Шиткин С.Л., Рожнов А.Б. и др. Применение рентгеновского метода для определения напряженного состояния деталей железнодорожного транспорта // *Известия вузов, Черная металлургия*. – Том 60. – № 3, 2017. – С. 200-206.
11. Киселев С.Н. Контроль остаточных напряжений в цельнокатаных колесах, возникающих в процессе изготовления и эксплуатации. Контроль. Диагностика. – 1999. – № 4. – С. 3-13.
12. Майкл Р. Хил. Метод разрезания. 31 с. Кафедра механической и аэрокосмической инженерии. Калифорнийский университет // Кн. Практические методы измерения остаточных напряжений / Под ред. Гари С. Schajer; опубли. компанией John Wiley Sons, 2013.
13. Ченг В., Финни И., Вардар О. (1991) Измерение остаточных напряжений вблизи поверхности с помощью прибора для измерения остаточных напряжений. «Метод соответствия трещине» // *Журнал инженерных материалов и технологий*. – 113 (2). – С. 199-204.
14. Европейский стандарт EN 13262-2004. Железнодорожный транспорт. Колесные пары и тележки. Колеса. Требования к продукции. – 46 с.
15. Межгосударственный стандарт ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. – Москва, Изд-во стандартов, 2011. – 27 с.

References

1. Kolbasko N.I., Morganyuk V.S., Lushchik L.V. Issledovanie termonapryazhennogo sostoyaniya stal'nyh izdelij v usloviyah intensifikacii ohlazhdeniya pri zakalke // Кн. Termicheskaya i termomekhanicheskaya obrabotka stali. – Moskva, Metallurgiya, 1984. – S. 26-31.

2. Bashnin YU.A., Ushakov B.K., Sekej A.G. Tekhnologiya termicheskoy obrabotki. – Moskva, Metallurgiya, 1996. – 424 s.
3. Balanovskij A.E. Plazmennoe poverhnostnoe uprochnenie metallov. – Irkutsk, Izd-vo IGTU, 2006. – 180 s.
4. Starodubov K.F., Savenkov V.YA., Polyakov S.N. Ostatochnye napryazheniya v kolesah // Kn. Voprosy proizvodstva zheleznodorozhnyh cel'nokatanyh koles. – Moskva, Izd-vo AN SSSR, 1989. – S.187-194.
5. Pavlov I.M., Gallaj YA.S., Astahov I.G. Rukovodstvo k laboratornomu praktikumu po prokatke. – Moskva, GNTI, 1967. – 253 s.
6. Danchenko N.I., Perkov O.N., Mironov P.F. i dr. Konstrukcionnaya prochnost' termicheski uprochnennyh cel'nokatanyh koles // Kn. Termicheskaya i termomekhanicheskaya obrabotka stali. – Moskva, Metallurgiya, 1984. – S.80-83.
7. Kanaev A.T., Sarsembaeva T.E., Topolyanskij P.A. Issledovanie izmeneniya vnutrennih napryazhenij v cel'nokatanyh zheleznodorozhnyh kolesah posle poverhnostnoj plazmennoj zakalki. Materialy X miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji Materialy X miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania swiatowej nauki-2019». – Volume 10. Techniczne nauki, Fizyka. – Przemysl, Nauka i Studia, 2019. – Str. 65-73.
8. Suhov A.V., SHitkin S.L. Problemy izmereniya ostatochnykh napryazhenij v cel'nokatanyh kolesah i drugih otvetstvennykh detal'nykh telezhek gruzovyh vagonov // Kn. Perspektivnye zadachi razvitiya zheleznodorozhnogo transporta. – Moskva, Intekst, 2010. – S. 244-253.
9. Vliyanie plazmennoj obrabotki na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie grebnej bandazha koles lokomotivov / S.N. Kiselev, A.V. Savruhin, G.D. Kuz'mina, A.S. Kiselev // Svarochnoe proizvodstvo. – 2001. – № 6. – S. 9-17.
10. Nikulin S.A., SHitkin S.L., Rozhnov A.B. i dr. Primenenie rentgenovskogo metoda dlya opredeleniya napryazhennogo sostoyaniya detal'nykh zheleznodorozhnogo transporta // Izvestiya vuzov, Chernaya metallurgiya. – Tom 60. – № 3, 2017. – S. 200-206.
11. Kiselev S.N. Kontrol' ostatochnykh napryazhenij v cel'nokatanyh kolesah, vznikayushchih v processe izgotovleniya i eksploatacii. Kontrol'. Diagnostika. 1999. – № 4. – S. 3-13.
12. Majkl R. Hil. Metod razrezaniya. 31 s. Kafedra mekhanicheskoy i aerokosmicheskoy inzhenerii. Kalifornijskij universitet // Kn. Prakticheskie metody izmereniya ostatochnykh napryazhenij / Pod red. Gari S. Schajer; opubl. kompaniej John Wiley Sons, 2013.
13. CHeng V., Finni I., Vardar O. (1991) Izmerenie ostatochnykh napryazhenij vblizi poverhnosti s pomoshch'yu pribora dlya izmereniya ostatochnykh napryazhenij. «Metod sootvetstviya treshchine» // Zhurnal inzhenernykh materialov i tekhnologij. – 113 (2) . – 199-204.
14. Evropejskij standart EN 13262-2004. Zheleznodorozhnyj transport. Kolesnye pary i telezhki. Kolesa. Trebovaniya k produkcii. – 46 s.
15. Mezhdgosudarstvennyj standart GOST 10791-2011. Kolesa cel'nokatanye. Tekhnicheskie usloviya. – Moskva, Izd-vo standartov, 2011. – 27 s.