

Одной из функций защиты является срабатывание вместо силового выключателя. В случае отказа силового выключателя или устройства защиты отключаются все остальные выключатели поста секционирования. Защита от замыкания на корпус отсутствует, так как в РУ с газовой изоляцией протекание тока между токоведущей частью и кожухом модуля соответствует короткому замыканию.

Компоненты автоматизации стандартной системы распределения, автоматики контроля воздушной контактной сети и защиты от ошибок при коммутации необходимо было доработать в связи с наличием трехпозиционного разъединителя и заземления через силовой выключатель. Потребовалось также улучшить отображение на экране центрального поста управления, чтобы привести его в соответствие с требованиями, разработанными в свое время для стандартных распределительных устройств, и обеспечить простоту их обслуживания.

Результаты и перспективы

Для монтажа установки и ее отладки на месте потребовалось в общей сложности всего пять рабочих дней, т. е. значительно меньше, чем для стандартного

распределительного устройства. Так как необходимо было испытать только узлы связи с оборудованием собственных нужд и центральным постом управления, монтаж вели особо тщательно, чтобы не допустить погрешностей и не задержать сдачу в эксплуатацию.

РУ с газовой изоляцией по надежности и безопасности работы отвечают современным международным требованиям к системам электроснабжения. Использование прошедшего типовые испытания распределительного устройства SITRAS 8DA11 значительно удлиняет интервалы технического обслуживания; предполагается, что срок его службы превысит 30 лет.

Ожидается повышение надежности работы цепей высокого напряжения по сравнению со стандартными распределительными устройствами, так как среднее время безотказной работы находящихся в эксплуатации базовых панелей 8DA/DB составляет более 4000 лет.

Общая концепция РУ с газовой изоляцией для тягового энергоснабжения может быть использована как при строительстве новых, так и при реконструкции имеющихся установок.

R. Braun et al. Elektrische Bahnen, 2003, № 4/5, S. 182 – 187.

УДК 629.4.027.4.002.3:669.14.018.294

Усталостные свойства колесной стали при высоких нагрузках

При исследовании усталостных свойств колесной стали марок R7 и B6, соответствующей рекомендациям МСЖД, и механики разрушения изготовленных из нее цельнокатаных колес и бандажей большое значение имел микроструктурный анализ материала. Помимо этого, проводились механические измерения, по результатам которых строили зависимость напряжений от деформаций, а также термометрический и резистометрический анализы. Для оценки предела усталости испытывали образцы с постепенным повышением нагрузки. Исследования с помощью оптической и электронной микроскопии служили для определения различий в микроструктуре, зависящих от режимов термообработки и конструкции детали, в данном случае колеса. Главной задачей исследования было изучение влияния структуры на усталостные свойства колесных сталей.

В Германии через десять лет в перевозках на дальние расстояния ожидается удвоение грузооборота до 150 млрд. ткм. В свете изменившихся требований, свя-

занных с более высокими осевыми нагрузками, необходимо дальнейшее совершенствование системы колесо — рельс до максимально возможных технических пределов.

В пятне контакта колеса с рельсом площадью около 1 см² возникает сложная термомеханическая картина нагрузки. Оптимизация колесных пар предполагает всесторонние знания обо всех параметрах используемой колесной стали, важных с точки зрения конструкционной и эксплуатационной прочности. В настоящее время расчет цельнокатаных колес выполняется в соответствии с уже известными стандартами, например МСЖД 510-5 или проектом европейского стандарта EN-13262-1.

Рассматриваемое исследование усталостных характеристик при высоких нагрузках и с использованием микроструктурного анализа проведено на цельнокатаных колесах стандарта МСЖД и бандажах,ковка и термообработка которых выполнены Объединением предприятий транспортной промышленности в г. Бохум (BVB). При этом важную роль играла оценка различных влияющих факторов, та-

Таблица 1

Химический состав сталей марок R7 и B6

Содержание	Химические элементы						
	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	Ni
Колесная сталь марки R7							
По МСЖД 812-3V	0,52	0,4	0,8	0,3	0,3	0,08	0,3
Измеренное значение	0,53	0,32	0,75	0,26	0,04	0,01	0,11
Бандажная сталь марки B6							
По МСЖД 810-1V	0,65	0,5	0,9	0,3	0,3	0,08	0,3
Измеренное значение	0,62	0,44	0,76	0,21	0,03	0,01	0,03

ких, например, как химический состав, режим нагружения и микроструктура. Последняя зависит от расположения зоны колеса, из которой вырезан образец.

Характеристики и химический состав колесной стали

Результаты химического анализа материала цельнокатаных колес с закаленными ободами (сталь марки R7) и бандажей (улучшенная сталь марки B6) приведены в табл. 1. Химический состав этих нелегированных доэвтектоидных сталей, выраженный в процентах массы, соответствует требованиям стандарта МСЖД 812-3V или 810-1V. Как видно из приведенных данных, стали этих марок характеризуются относительно небольшим содержанием кремния, марганца и хрома.

В ходе термообработки, проводившейся в соответствии с технологическим процессом, поверхность катания исследуемых цельнокатаных колес подвергалась ускоренному охлаждению на воздухе, а бандажи погружали в ванну. В зависимости от массы и геометрии колеса в разных его зонах отмечались различные значения скорости охлаждения. Влияние процессов охлаждения на формирование микроструктуры может иллюстрироваться диаграммами состояния.

В зависимости от выбранной зоны колеса формируется определенная микроструктура, которую исследуют на шлифах с помощью оптического микроскопа. В стали марки R7 доля феррита в ферритно-перлитной структуре значительно возрастает по мере снижения скорости охлаждения.

Зависящие от температуры процессы диффузии определяют величину расстояний между пластинками цементита в перлите. Эти расстояния уменьшаются с увеличением скорости охлаждения. В цельнокатаном колесе из стали R7 данные расстояния вблизи поверхности катания в среднем равны

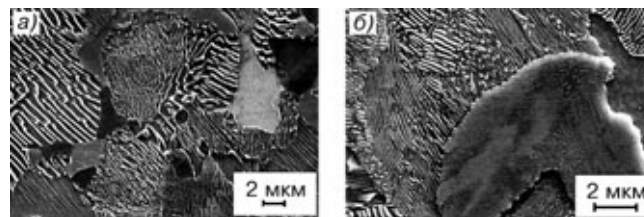


Рис. 1. Микроструктура сталей марок R7 (а) и B6 (б)

0,14 мкм. В направлении к гребню они увеличиваются до 0,19 мкм.

В материале бандажа расстояния между пластинками цементита (сталь B6) лежат в диапазоне 0,12 – 0,15 мкм в середине поперечного сечения. На рис. 1, где показана микроструктура сталей R7 и B6, снятая с помощью растрового электронного микроскопа (REM), хорошо видны пластинки цементита.

Для количественного определения относительного содержания феррита можно использовать трехмерные столбчатые диаграммы. Такое исследование колеса из стали R7 показало, что структура в области поверхности катания содержит 6 % феррита (по площади образца). По мере удаления от поверхности относительное содержание феррита возрастает втрое (до 18 %). С помощью таких же диаграмм была определена твердость по Виккерсу. В зоне гребня она составила 230 HV, а у поверхности катания 290 HV.

Для бандажей колес из стали B6 характерна ферритно-перлитная структура с содержанием феррита, ориентированного по границам зерен в середине поперечного сечения, не более 2 – 3 %. Твердость такой структуры возрастает от 300 HV в середине сечения до 330 HV вблизи поверхности катания.

Изготовление образцов

Для подробного исследования локальных проявлений усталости материала и характера местных повреждений были взяты 14 образцов из стали R7 и 19 из стали B6. Длина такого образца составляет 115 мм, диаметр 7,6 мм. Образцы вырезали в тангенциальном направлении, т. е. таким образом, чтобы продольная ось образца была перпендикулярна плоскости поперечного сечения обода и соответственно бандажа (рис. 2).

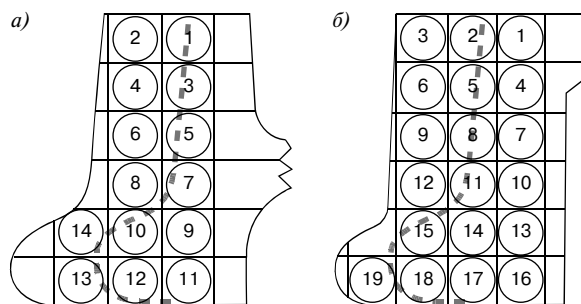


Рис. 2. Направления вырезки образцов из цельнокатаного колеса (а) и бандажа (б)

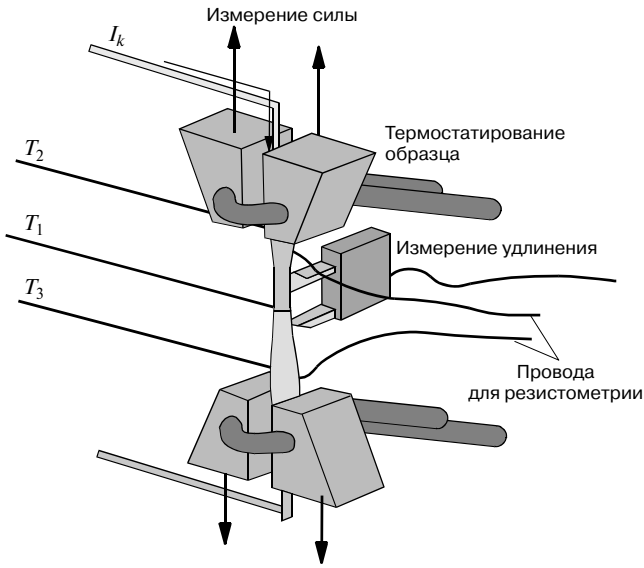


Рис. 3. Схема построения испытательной установки

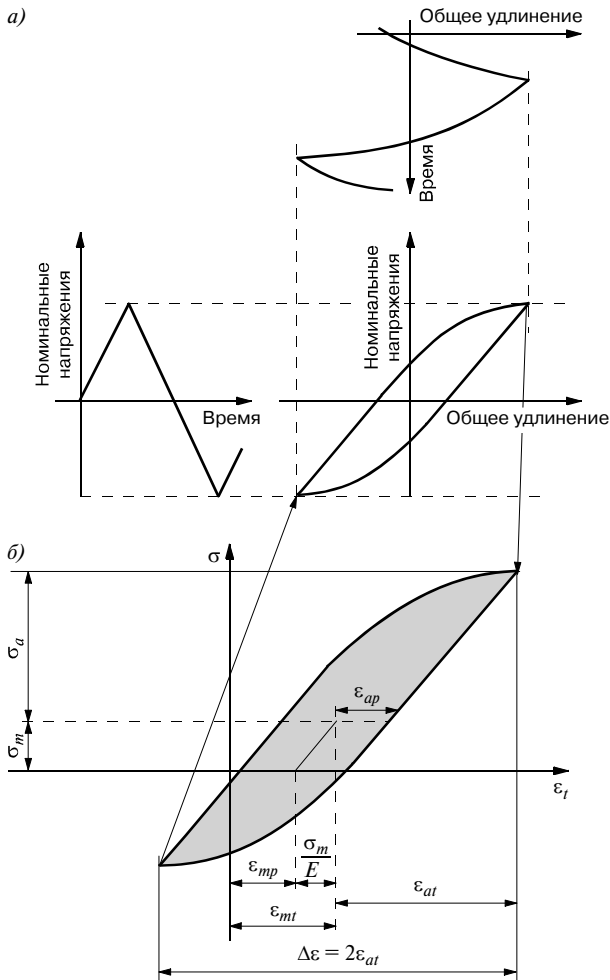


Рис. 4. Построение гистерезисной кривой при исследовании зависимости амплитуды внутренних напряжений от общего удлинения (а) и характеристические точки гистерезисной кривой (б):

σ — номинальное значение внутренних напряжений; ϵ_t — общее удлинение; σ_a — амплитуда внутренних напряжений; σ_m — среднее значение напряжений; ϵ_{at} — амплитуда общего удлинения образца; ϵ_{mt} — среднее значение общего удлинения; ϵ_{mp} — среднее значение пластической деформации; ϵ_{ap} — амплитуда пластического удлинения; E — модуль Юнга

Образцы с номерами 2, 4, 6 и 8 из стали R7 вырезаны в зоне, прилегающей к поверхности катания безбандажного колеса, а с номерами 1, 3, 5 и 7 — на границе зоны максимального износа. К зоне гребня относятся образцы 13 и 14. Штриховые линии показывают границу зоны предельного износа.

На первом этапе изготовления образцов колесо было разрезано на сегменты длиной около 140 мм при минимальной подаче режущего инструмента и интенсивном охлаждении зоны реза. После этого из сегментов были вырезаны заготовки квадратного сечения, маркированные с торцевой стороны. На следующем этапе заготовкам придали заданную геометрию с помощью токарной обработки. Рабочий участок образца полировали, обеспечив чистоту обработки, соответствующую высоте шероховатостей не более 0,4 мкм.

Для определения квазистатической характеристики деформации были изготовлены образцы для испытаний на растяжение. Эти испытания показали, что в силу различий микроструктуры в разных зонах колеса предел прочности на растяжение стали R7 в зоне гребня равен 800 МПа, а у поверхности катания — 900 МПа. Что касается бандажа из стали B6, то здесь различия в величинах предела прочности на растяжение меньше, а именно 980 МПа в середине поперечного сечения и 1040 МПа у поверхности катания. При повышении температуры у образцов с надрезом для испытаний на ударную вязкость, изготовленных из стали R7 в соответствии с рекомендациями МСЖД, возрастает энергия разрушения с 20 Дж при -50°C до 40 Дж при 100°C . У бандажной стали B6 эти параметры на 50 % выше.

Оборудование и методика проведения испытаний

Для проведения испытаний на вибропрочность использовалась система компании Schenck (максимальная нагрузка 100 кН) с электронным регулированием. Испытания проводили с частотой приложения нагрузки $f = 5$ Гц. При этом увеличивали и снижали ее в соответствии с функцией, отображаемой пилообразной кривой при комнатной температуре. Предельное число циклов нагружения составило $N_g = 2 \cdot 10^6$, после чего наступало усталостное разрушение образца. В ходе этих испытаний снимали также характеристику зависимости величины деформаций от внутренних напряжений.

На рис. 3 дано схематическое изображение способа закрепления усталостного образца, расположения измерительных датчиков и мест приложения нагрузки. Тензометрические измерения выполняются емкостным методом с помощью кольцевого конденсатора, с высокой точностью фиксирующего изменения радиальной координаты.

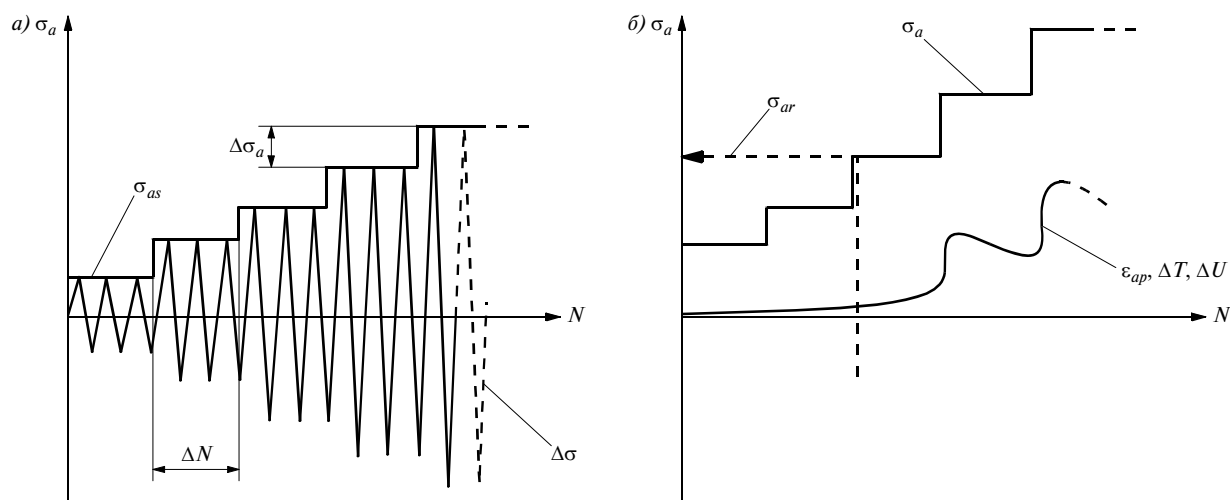


Рис. 5. Увеличение нагрузки (а) и реакции материала (б) при испытаниях по методу LSV:

σ_a — амплитуда внутренних напряжений; N — число циклов нагружения; σ_{ar} — характеристическая величина внутренних напряжений, с которой начинаются реакции материала; ϵ_{ap} — амплитуда пластического удлинения; ΔT — изменение температуры; ΔU — изменение электрического напряжения

Благодаря регистрации температуры образца можно обнаружить необратимые процессы пластической деформации, сопровождающиеся значительным рассеянием энергии в виде тепла (до 90 % затрачиваемой механической энергии).

В середине шейки образца, подверженной упругопластическим деформациям, устанавливается термопара T_1 (Fe-CuNi), а на обоих переходах к шейке — такие же термопары T_2 и T_3 . Расчетом дифференциальной температуры $\Delta T = T_1 - 0,5(T_2 + T_3)$ обеспечивается учет только пластических деформаций, а также компенсация мешающих внешних воздействий.

Электрическое сопротивление образцов зависит от геометрических размеров, и прежде всего от удельного сопротивления материала. В ходе испытаний через образец протекал стабилизированный постоянный ток 8 А. Согласно закону Ома сопротивление между двумя точками образца можно определить по величине падения напряжения ΔU на заключенном между ними участке.

Измерения температуры и сопротивления могут проводиться на образцах или деталях любой длины, в том числе на ненагруженных образцах и натуральных деталях. Последние могут проверяться в рамках осмотров и профилактических работ по техническому обслуживанию.

Принцип построения гистерезисной кривой при определении зависимости между деформациями и внутренними напряжениями показан на рис. 4. При проведении испытаний результаты измерения номинальных внутренних напряжений показали, что процесс их изменения в функции времени отображается пилообразной кривой. Суммирование этой функции с кривой, показывающей зависимость полного удлинения от времени, дает кривую в виде петли гистерезиса, являющуюся функцией номинальных напря-

жений от полного удлинения образца. При абсолютно упругом поведении нагружаемых образцов петля превращается в так называемую прямую Гука.

Амплитуда пластического удлинения ϵ_{ap} учитывает изменения механических свойств материала при знакопеременной нагрузке и служит мерой повреждения. Построение зависимости ϵ_{ap} от числа циклов нагружения N дает так называемые кривые циклических деформаций.

Наряду с оценкой амплитуды внутренних напряжений σ_a , проводившейся в рамках исследования параметров долговечности, можно было на основе анализа микроструктурных изменений дать целостную оценку усталостного состояния материала с помощью таких параметров разрушения образца, как например, ϵ_{ap} , ΔT и ΔU .

Результаты определения усталостной прочности, подтвержденные методами математической статистики, могут быть существенно уточнены данными, получаемыми в результате сравнения химического состава сплавов и методов их термообработки.

Комплекс усталостных испытаний на образцах, дающий возможность построения кривых Вёлера как инструмента оценки усталостной прочности, называется методом испытаний с нарастающей нагрузкой (LSV). Результаты таких испытаний показали, что полученные термометрические значения предела усталостной прочности для разных марок улучшенной стали хорошо согласуются с результатами, отраженными в кривых Вёлера.

На рис. 5, а приведена кривая ступенчатого нагружения по методу LSV. Начиная с заведомо безопасной величины $\sigma_{as} = 100$ МПа амплитуду внутренних напряжений повышают ступенями по $\Delta\sigma_a = 20$ МПа в течение всего интервала нагружения $\Delta N = 9 \cdot 10^3$ вплоть до разрушения образца. При характеристической амплитуде σ_{ar} возникают

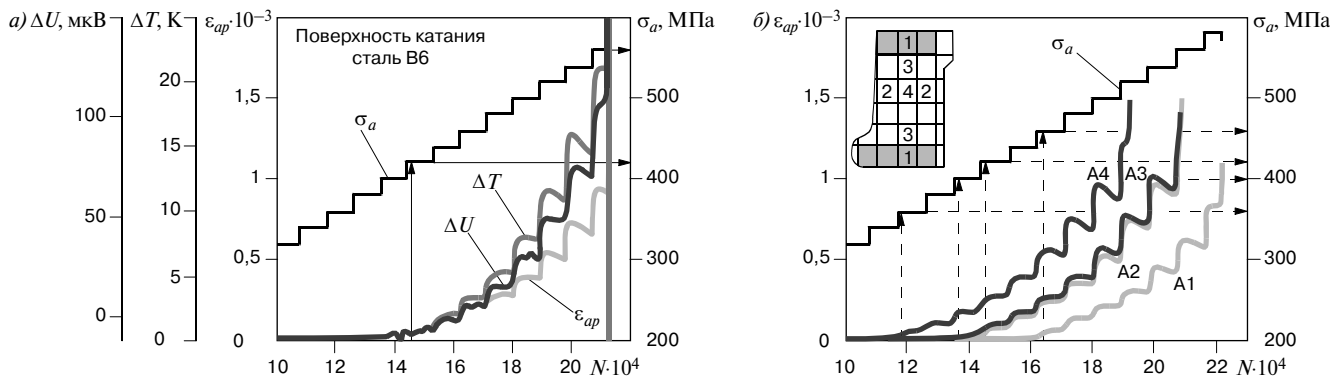


Рис. 6. Испытания по методу LSV образцов из стали В6, вырезанных из зоны поверхности катания бандажа 9 (а) и других зон сечения (б): А1 – А4 – обозначение зон сечения бандажа, из которых вырезаны образцы. Остальные позиции, как на рис. 5

первые, поддающиеся измерению реакции материала, проявляющиеся в виде изменения параметров ϵ_{ap} , ΔT и ΔU (рис. 5, б).

Результаты испытаний

На рис. 6, а показано отображение результатов для фрагмента, выделенного из общего цикла усталостных испытаний по методу LSV. Приведенные данные относятся к образцу, вырезанному в зоне поверхности катания бандажа из стали В6. Ступенчатым изменениям величины внутренних напряжений σ_a соответствуют реакции материала, отображаемые кривыми амплитуды пластической деформации ϵ_{ap} , разницы температур ΔT и изменений напряжения ΔU . Первые заметные реакции появляются при величине внутренних напряжений $\sigma_a = \sigma_{ar} = 420$ МПа. На последующих этапах нагружения эти величины заметно возрастают, причем кривые их изменения также имеют ступенчатый характер. Разрушение образца происходит при амплитуде внутренних напряжений, равной 560 МПа. На рис. 6, б приведены полученные при испытаниях методом LSV кривые из-

менения амплитуды пластической деформации для разных сечений (А1 – А4) бандажа из стали В6. Образцы, взятые из гребня бандажа и противоположной ему торцевой зоны (А1), выдерживают при сопоставимом остаточном удлинении гораздо более высокие амплитуды напряжений, чем образцы, взятые из середины поперечного сечения (А4). Для образцов А1 степень нагрузки $\sigma_{ar} = 460$ МПа, а для А4 – 360 МПа (табл. 2). Уменьшение ϵ_{ap} в пределах одной ступени нагружения объясняется циклическими процессами упрочнения.

Приведенные на рис. 7, а кривые циклических деформаций для $\sigma_a = 400$ МПа подтверждают на примере цельнокатаного колеса из стали марки R7, что усталостные свойства материала в значительной мере зависят от локальной микроструктуры. Кривые, полученные при усталостных испытаниях 14 образцов (рис. 7, б), можно распределить на три семейства, относящиеся к поверхности катания, зоне предельного износа и гребню. Они характеризуются разной продолжительностью инкубационного периода, предшествующего возникновению первых признаков циклического разупрочнения при нарастающих значениях амплитуды пластической деформации ϵ_{ap} .

После прохождения первого максимума разупрочнения начинается процесс циклического упрочнения, длящийся почти до момента разрушения образца. Уменьшение поперечного сечения, вызванное распространением макротрещины, приводит к фиктивному вторичному колебательному разупрочнению. Максимальные амплитуды остаточного удлинения, приблизительно равные $1,3 \cdot 10^{-3}$, возникают в образцах, вырезанных из зоны гребня. Они ведут к снижению срока службы (по сравнению с образцами из зоны поверхности катания) примерно в 10 раз.

На рис. 7, в показаны кривые зависимости ϵ_{ap} , ΔT и процентного содержания феррита от числа циклов нагружения N_b , вызывающего разрушение образцов цельнокатаного колеса. Результаты измерений взяты из кривых циклических деформаций для числа цик-

Таблица 2

Сравнение характеристических значений σ_{ar} (метод LSV) с предельными значениями σ_{aN} (кривые Вёлера)

Параметр	Зоны сечения			
	A1	A2	A3	A4
Цельнокатаное колесо, сталь R7				
σ_{ar} , МПа	340	300	280	—
σ_{aN} , МПа	360	330	320	—
Соотношение σ_{ar}/σ_{aN}	0,94	0,9	0,88	—
Бандаж, сталь В6				
σ_{ar} , МПа	460	420	400	360
σ_{aN} , МПа	480	460	420	380
Соотношение σ_{ar}/σ_{aN}	0,96	0,91	0,95	0,95

лов нагружения, которое в 2 раза меньше разрушающего. Кривые изменения всех трех исследуемых параметров имеют одинаковый характер, т. е. с уменьшением содержания феррита уменьшаются также $\epsilon_{ар}$ и ΔT . При этом число циклов, вызывающих разрушение образца, растет.

Съемки, выполненные с помощью электронного микроскопа (рис. 8), показывают, что характер дислокационных структур зависит от числа циклов нагружения. Исследования микроструктуры и рентгеновское определение плотности дислокаций были проведены в Институте металловедения Технического университета во Фрайберге (Германия).

Исходное состояние стали R7 (0 % N_B , т. е. до начала нагружения) характеризуется наличием ферритных участков субзернистой структуры с плотностью свободных дислокаций $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Что касается нагрузки, составляющей 5 % N_B , то здесь в пределах срока службы имеет место максимальное циклическое разупрочнение вытянутых прерывистых дислокаций.

При нагрузке 85 % N_B происходит упрочнение материала, связанное с уменьшением размера дислокаций, плотность которых в интервале нагрузок от 5 до 85 % N_B растет от $(3 \div 5) \cdot 10^9$ до $(6 \div 8) \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Как видно из результатов, речь идет о небольших изменениях микроструктуры в течение всего интервала вплоть до достижения разрушающего числа циклов. Плотность дислокаций в стали бандажа заметно возрастает с увеличением числа циклов нагружения в зоне поверхности катания, а в середине поперечного сечения увеличивается лишь незначительно и почти не изменяется начиная с нагрузки 5 % N_B .

Влияние локальной микроструктуры на срок службы колес из стали обоих видов наглядно отражают кривые Вёлера на рис. 9. Предел усталостной прочности σ_{aN} цельнокатаного колеса из стали R7 лежит в диапазоне от 320(A3) до 360(A1) МПа. Образцы из стали бандажа В6 можно нагружать с амплитудами напряжений от 380(A4) до 480(A1) МПа и числом циклов $2 \cdot 10^6$.

Если у цельнокатаного колеса в разных участках сечения усталостные характеристики различаются незначительно, то в бандаже (например, между зонами А1 и А4) они могут достигать 110 МПа.

Для сталей обеих марок (см. табл. 2) дано сравнение характеристических амплитуд внутренних на-

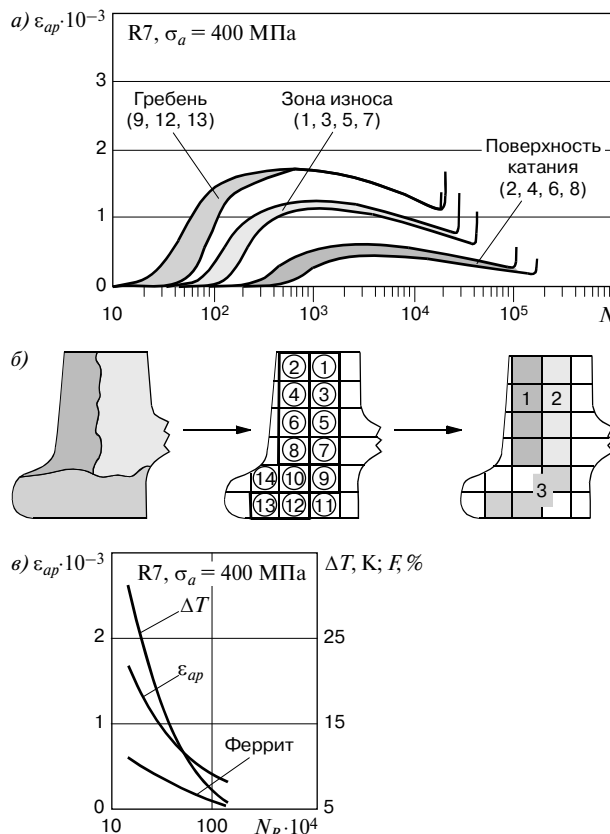


Рис. 7. Кривые циклических деформаций (а), расположение образцов в сечении (б), зависимости $\epsilon_{ар}$, ΔT и процентного содержания феррита от числа циклов нагружения N_B , вызывающего разрушение образцов цельнокатаного колеса:

F — процентное содержание феррита; N_B — число циклов нагружения, вызывающего разрушение образца. Остальные позиции, как на рис. 5

пряжений $\sigma_{ар}$, измеренных методом LSV, с пределами усталостной прочности σ_{aN} , полученных из кривых Вёлера. Из анализа соотношений видно, что в диапазоне их значений 90 – 95 % с помощью $\sigma_{ар}$ можно с хорошим приближением дать оценку предела усталостной прочности.

Выводы

В рамках проведенных исследований микроструктуры удалось установить различия в структуре сталей R7 и В6, которые зависели от геометрии колеса и соответственно бандажа, их массы и термообработки.

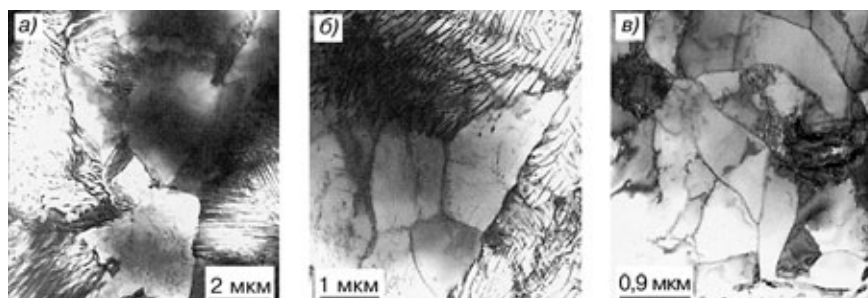


Рис. 8. Микроструктура стали R7 для разных ступеней нагружения: а — без нагрузки ($N_B = 0$); б — $N_B = 5 \%$; в — $N_B = 85 \%$

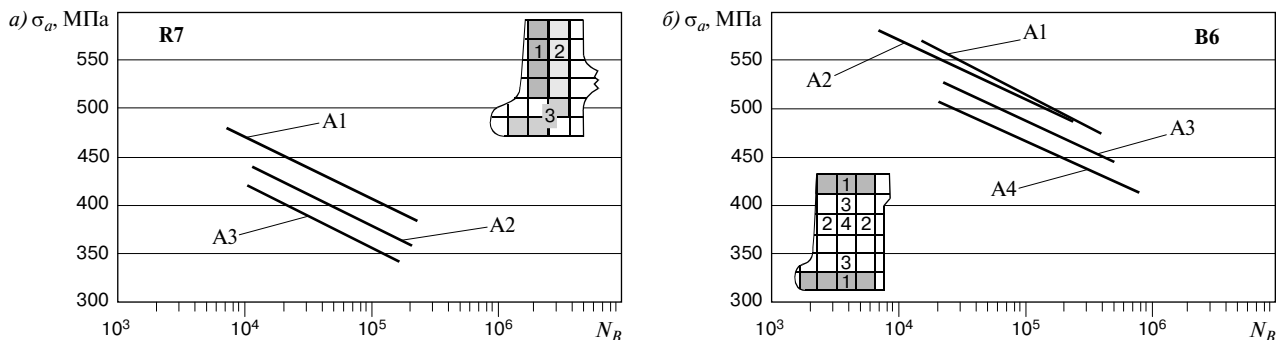


Рис. 9. Локальные кривые Вёлера для сталей R7 (а) и B6 (б): обозначение позиций, как на рис. 6, 7

Ферритно-перлитная структура цельнокатаного колеса из стали R7 характеризуется минимальным содержанием феррита в зоне поверхности катания и максимальным — в зоне гребня. В середине поперечного сечения бандажа доля феррита также невелика. Содержание феррита непосредственно связано с твердостью. На примере усталостных образцов, вырезанных из оригинальных деталей, удалось показать, что локальные значения процентного содержания феррита и перлитная структура, обуславливаемые процессами разупрочнения и следующего за ним упрочнения, определяют усталостные свойства материала.

Для механических измерений гистерезисной кривой, отражающей зависимость между внутренними напряжениями и деформацией, целесообразно дополнительно использовать термометрический и резистометрический анализы, что позволяет с большей определенностью показать влияние локальной микроструктуры на усталостные свойства и характер разрушения деталей. Эти виды анализа особо эффективны для исследований диапазонов низких и высоких амплитуд нагружений.

F. Walther et al. Eisenbahningenieur, 2004, № 5, S. 41 – 48.

УДК 656.257

Система МПЦ ZBS2000 для малодеятельных линий

Железные дороги Германии (DBAG) приступили к концептуальной разработке упрощенной техники микропроцессорной централизации (ESZB), предназначенной для линий с диспетчерским управлением движением поездов. Новая концепция должна существенно сократить затраты на системы управления и обеспечения безопасности на второстепенных линиях. Компания Scheidt & Bachmann разрабатывает систему микропроцессорной централизации ZBS2000, которая будет удовлетворять техническим требованиям системы EZBS и построена на основе безопасного вычислительного ядра применяемой на DBAG системы переездной сигнализации BUES 2000. Прототип системы ZBS2000 испытывается на линии Корбах — Брилон-Вальд.

На DBAG и других железных дорогах есть много железнодорожных линий с упрощенными условиями эксплуатации, для которых необходимо оптими-

зировать управление движением поездов, которое все еще требует большого штата персонала. В настоящее время эти железные дороги заняты поиском экономически эффективных технических решений для повышения рентабельности таких линий. DBAG объединили требования для линий с упрощенными условиями эксплуатации и на их основе сформировали концепцию ESZB.

Модульная система микропроцессорной централизации ZBS2000

Система микропроцессорной централизации (МПЦ) ZBS2000 основана на системе переездной сигнализации BUES 2000, поставляемой компанией Scheidt & Bachmann на железные дороги Германии и ряда других стран. Система BUES 2000 имеет допуск к эксплуатации Федерального бюро железнодорожного транспорта Германии (EVA), основанный на