

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.172.25/625.143

Влияние электрического тока на механические характеристики рельсовой стали

В. А. Стрижало, Л. С. Новогрудский, Н. Я. Оправхата

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

Представлены результаты исследований влияния импульсов электрического тока большой плотности на механические характеристики рельсовых сталей в исходном состоянии и после длительной эксплуатационной наработки. Показано влияние условий нагружения при эксплуатации и режимов воздействия импульсов электрического тока на механические характеристики стали и их анизотропию.

Ключевые слова: механические характеристики, деформация, напряженное состояние, анизотропия, импульсы электрического тока, рельсовая сталь.

Введение. Железнодорожный транспорт занимает одно из первых мест по объемам грузовых и пассажирских перевозок во многих странах мира, в том числе и в Украине. В последнее время стратегия развития железнодорожной транспортной системы направлена на увеличение объема перевозок за счет уменьшения временного интервала между поездами, повышения общего веса поездов и скорости их движения, комфортности и безопасности пассажирских перевозок. Для этого вводятся в эксплуатацию магистрали с ускоренным движением и новые типы подвижного состава.

В результате увеличения веса поездов и скорости их движения возрастают уровни механических нагрузок на верхнее строение пути и плотности тяговых токов, потребляемых электровозами. Рельсовое полотно работает в условиях сложного напряженного состояния: воспринимает действие вертикальных и горизонтальных сил от подвижного состава, продольных сил тяги от ведущих колес локомотива и сил торможения, продольных растягивающих и сжимающих сил, вызванных изменением температуры относительно температуры закрепления плетей [1, 2]. Во многом нормальный режим работы рельсового транспорта зависит от способности высоконагруженных элементов конструкции верхнего строения пути сопротивляться деформированию и разрушению, обеспечения непрерывности их взаимодействия с подвижным составом, долговечности и надежности этих элементов в течение всего срока эксплуатации. Конструктивной особенностью электрофицированного железнодорожного транспорта, выделяющей его в отдельную категорию потребителей электрической энергии, является способ подвода электропитания к подвижному составу. Электрические системы, обеспечивающие энергопита-

ние подвижного состава, сигнализации и контроля безопасности движения объединены с рельсовыми колеями и замыкаются в зоне взаимодействия контактной пары колесо–рельс. Под действием эксплуатационных механических нагрузок высокого уровня и больших плотностей электрического тока материал головки рельса в малых зонах работает в условиях особой экстремальности [3].

Многочисленные исследования по оценке влияния электромагнитного воздействия на механические свойства металлических материалов различных классов [4, 5] показывают, что действие электрического тока способно существенно их изменить. Проведенный ранее [6] анализ литературных данных о механическом состоянии пути, уровне и режимах электрического воздействия на рельсы позволяет утверждать, что условия их работы соответствуют условиям, при которых возможно протекание электропластической деформации [5]. Исследование поведения рельсовых материалов при воздействии электрического тока дает возможность изучить закономерности изменения механических характеристик сталей этого класса, благодаря чему можно оптимизировать режимы их обработки при изготовлении и нагружении в процессе эксплуатации изделий.

Методика проведения эксперимента. Испытания проводили на установке УТН-10, предназначенной для исследования влияния импульсов электрического тока (ИЭТ) на механические характеристики металлических материалов. Объектом исследования служили пятикратные цилиндрические образцы диаметром рабочей части 4 мм, изготовленные из рельсов типа Р65. В соответствии с требованиями ГОСТ 18267–82 [7] заготовки для образцов на растяжение вырезали в продольном и поперечном направлении по отношению к направлению проката рельса из неэксплуатировавшегося рельса и рельса после длительной (суммарная грузонапряженность участка пути составляла ~900 млн. тонн брутто) эксплуатации на прямом участке и в повороте пути.

При проведении исследований часть образцов подвергали воздействию ИЭТ, направляемых вдоль оси образца. Электрический ток подводили с помощью специальных контактов, которые крепили на образце вблизи его рабочего участка. В процессе испытаний воздействие ИЭТ на образцы из рельсовых сталей осуществляли в двух режимах:

1) в процессе активного нагружения через деформируемый образец пропускали ИЭТ плотностью $J = 255 \text{ МА/м}^2$ и длительностью $\tau = 10^{-2} \text{ с}$ при определенных уровнях нагрузки. Пропускание первого ИЭТ через образец осуществляли на уровне $0,3P_{0,2}$ ($P_{0,2}$ – уровень нагрузки, соответствующий условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$). Дальнейшее однократное воздействие импульса электрического тока проводили с шагом $0,1P_{0,2}$ до полного разрушения образца;

2) процесс активного нагружения прекращали по достижении уровня $0,6P_{0,2}$. При постоянной нагрузке пропускали 20 импульсов с теми же параметрами, как и в первом режиме, выдерживая значительный временной интервал между импульсами для исключения макроразогрева материала рабочего участка испытываемого образца. После этого нагружение возобновляли до полного разрушения образца.

При испытаниях цилиндрических образцов регистрировали диаграммы растяжения в координатах нагрузка–перемещение. По результатам испытаний не менее трех образцов определяли средние значения характеристик статической прочности и пластичности стали.

Воздействие собственного магнитного поля электрического тока на проводник. При пропускании электрического тока через проводник могут возникнуть эффекты, искажающие линейное напряженное состояние образцов, внося тем самым погрешность в оценку степени влияния ИЭТ на поведение исследуемого материала. Оценим степень дополнительного влияния, вызванного собственным магнитным полем, на исследуемый материал, определив величину пондеромоторных сил, неравномерность распределения плотности импульса электрического тока по сечению образца (скин-эффект), а также джоулев разогрев [4, 5].

Неравномерность распределения плотности электрического тока по сечению проводника можно оценить по величине скин-слоя, рассчитываемого по формуле

$$S_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_a}}, \quad (1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала; f – частота электрического тока; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость материала; $S_{\text{ск}}$ – толщина скин-слоя.

При подстановке в формулу (1) соответствующих значений характеристик рельсовой стали и параметров ИЭТ получим $S_{\text{ск}} = 10$ мм, что больше радиуса рабочего участка образца, поэтому можно говорить о практическом отсутствии скин-эффекта ИЭТ.

Вокруг проводника с током возникает магнитное поле, действующее на электроны проводимости с силой, направленной к центру проводника. Для цилиндрического проводника величина напряженности магнитного поля определяется по формуле

$$H = \frac{I}{2\pi r}, \quad (2)$$

где I – сила тока; r – радиус проводника; H – напряженность магнитного поля.

Выражение для расчета поверхностного давления от сил сжатия проводящей среды, вызванного собственным магнитным полем, имеет вид

$$P = \frac{\mu H^2}{8\pi^2}, \quad (3)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость.

В момент действия электрического тока заданных параметров поверхностное давление на рабочем участке образца $P = 65,26$ кПа. При этом дополнительная осевая нагрузка $F = 2\nu PS = 10$ Н (ν – коэффициент Пуассона; S – площадь боковой поверхности проводника), что не может существенно

повлиять на процесс деформирования и значения механических характеристик.

Прохождение ИЭТ в материале образца может разогревать его по длине или в локальных зонах, что в результате приведет к снижению сопротивления металла деформированию и пластическому течению при меньших уровнях нагрузки. Прирост температуры можно определить из выражения [4]

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{C_v m}, \quad (4)$$

где ΔT – прирост температуры; ΔQ – прирост внутренней энергии; C_v – удельная массовая теплоемкость; m – масса проводника.

В соответствии с формулой (4) прирост температуры образца после действия одного ИЭТ составляет ~ 17 К. Для снижения влияния возможного разогрева материала на процесс деформирования и механические характеристики между последовательными импульсами электрического тока выдерживали временную паузу, обеспечивая таким образом остывание металла рабочего участка образца до температуры окружающей среды.

Изменение механических характеристик рельсовой стали при действии ИЭТ. Проведенные исследования показывают, что эксплуатация рельсов на прямом участке и в повороте пути вызывает увеличение прочности материала головки в поперечном направлении и практически не изменяет ее в продольном. Для рельса, работавшего на прямом участке пути, уровень предела прочности и условного предела текучести в поперечном направлении незначительно превышает аналогичные значения в продольном направлении. При длительной наработке рельса в повороте пути значения характеристик прочности образцов, вырезанных в поперечном и продольном направлении, становятся близкими.

Анализ изменений механических характеристик рельсовой стали проводили в относительном виде. При этом значения характеристики в результате действия ИЭТ сравнивали с исходным значением. Степень изменения определяли из выражений

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{\sigma_{\text{в}}^{\text{ИЭТ}} - \sigma_{\text{в}}}{\sigma_{\text{в}}} \cdot 100\%; & K_2 &= \frac{\sigma_{0,2}^{\text{ИЭТ}} - \sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2}} \cdot 100\%; \\ K_3 &= \frac{\delta^{\text{ИЭТ}} - \delta}{\delta} \cdot 100\%; & K_4 &= \frac{\psi^{\text{ИЭТ}} - \psi}{\psi} \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученные данные о влиянии ИЭТ на изменения механических характеристик представлены на рис. 1. Испытания цилиндрических образцов, вырезанных из неэксплуатировавшегося рельса, показывают, что действие ИЭТ в процессе активного нагружения оказывает незначительное (до 5%) влияние на изменения характеристик прочности в продольном и поперечном направлении проката рельса (рис. 1,а). Действие ИЭТ на образцы рельса после наработки на прямом участке пути (рис. 1,б,в) существенно уменьшает значения характеристик прочности стали в продольном направлении: при

испытаниях по режиму 1 – предел прочности σ_B на 17%, условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ на 31%; при испытаниях по режиму 2 – σ_B на 16%, $\sigma_{0,2}$ на 25%. Характеристики пластичности образцов после наработки на прямом участке пути, испытанные по режиму 1 (рис. 1,б), изменяются таким образом: относительное удлинение после разрыва δ возрастает на 11%, относительное сужение после разрыва ψ практически не изменяется; δ и ψ образцов, испытанных по режиму 2 (рис. 1,в), уменьшаются на 15 и 30% соответственно. Для образцов, вырезанных в поперечном направлении, действие ИЭТ значительно увеличивает пластичность при испытаниях по режиму 1 (δ на 45%, ψ на 75%), при испытаниях по режиму 2 она изменяется меньше (δ на 18%, ψ на 10%) – рис. 1,б,в.

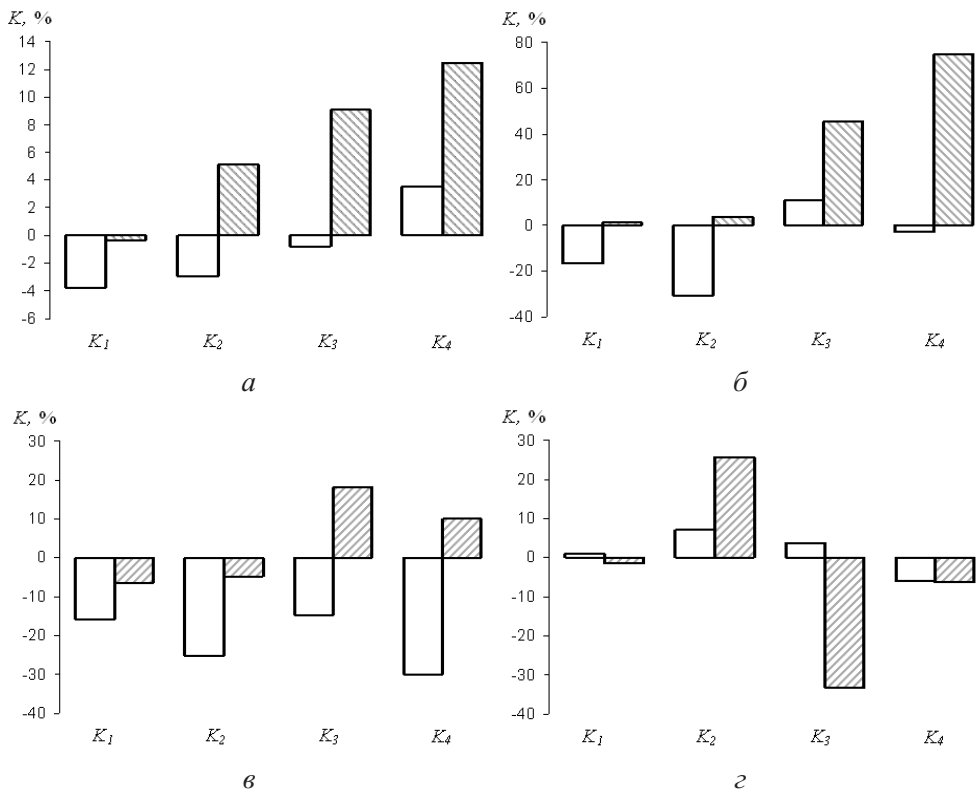


Рис. 1. Относительное изменение механических характеристик рельсовой стали при действии ИЭТ: а – рельс до укладки в путь при испытаниях по режиму 1; б, в – рельс после наработки на прямом участке пути при испытаниях по режимам 1 и 2; г – рельс после наработки в повороте пути при испытаниях по режиму 2; штриховкой показано относительное изменение характеристик в поперечном направлении.

Эксперименты, проведенные на образцах, изготовленных из рельса после наработки в повороте пути при действии ИЭТ, показывают (рис. 1,г), что предел прочности стали в обоих направлениях практически не изменяется по сравнению с исходным состоянием. В то же время условный предел текучести образцов, вырезанных в поперечном направлении, при испытаниях по режиму 2 увеличивается на 26%. Значения относительного сужения после разрыва образцов в обоих направлениях вырезки и относительного удлинения

после разрыва образцов, вырезанных в продольном направлении, незначительно изменяются. Наиболее существенно уменьшается значение δ образцов, изготовленных поперек направления прокатки.

Анизотропия механических характеристик рельсовой стали. Анизотропия физических и механических свойств наблюдается в большей или меньшей степени практически у всех металлических изделий, подвергнутых деформации [8, 9]. Материал с исходной анизотропией в процессе эксплуатации приобретает также вторичную анизотропию, которая в зависимости от условий нагружения и длительности может как увеличить имеющуюся, так и уменьшить разность в значениях механических характеристик по направлениям. Известны данные о влиянии ИЭТ на изменение характера и вида анизотропии физико-механических свойств материалов в широком температурном диапазоне [10]. Железнодорожные рельсы на стадии изготовления подвергаются значительным пластическим деформациям (общая вытяжка при прокатке рельсов типов Р65 должна быть не менее 35% из слитков и 9,6% из заготовок непрерывного литья [11]), формирующим геометрическую направленность зерен металла. Всестороннее обжатие материала и сложная геометрия поперечного сечения рельса, приводя к повышению общей работоспособности конструкции, формируют и исходную анизотропию рельсового материала.

Степень анизотропии механических характеристик рельсовой стали оценивали с помощью коэффициента анизотропии A , который определяли из выражения

$$A = \frac{\max - \min}{\min} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где \max и \min – максимальное и минимальное значения механических характеристик соответственно по направлениям.

До укладки в путь исходная анизотропия всех механических характеристик рельсов имеет прямой вид (прямая анизотропия – значения характеристик в продольном направлении больше, чем в поперечном направлении, обратная, наоборот) – рис. 2.

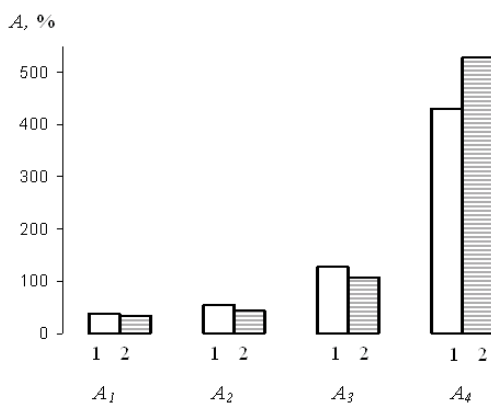


Рис. 2. Исходная анизотропия механических характеристик рельсов до укладки в путь: 1 – без действия ИЭТ; 2 – при действии ИЭТ по режиму 1. (Здесь и на рис. 3: A_1 , A_2 , A_3 и A_4 – анизотропия механических характеристик σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ и ψ соответственно).

Эксплуатация рельсов на разных участках пути с различными условиями нагружения приводит к изменению характера и степени анизотропии механических свойств стали. Так, после длительной наработки на прямом участке пути исходная анизотропия характеристик прочности изменяется от прямой к обратной (рис. 3,а). Характер анизотропии пластичности не изменяется и остается прямым. Значения коэффициентов анизотропии характеристик σ_B , $\sigma_{0,2}$ и ψ в 15,40, 5,35 и 1,73 раза меньше, чем для рельса до эксплуатации. И лишь для относительного удлинения коэффициент анизотропии увеличивается в 1,14 раза. Условия нагружения рельса при длительной наработке в повороте пути не изменяют характер анизотропии механических свойств по сравнению с рельсом до укладки в путь, а приводят к существенному уменьшению значений коэффициентов анизотропии характеристик прочности и практически не влияют на уровень значений коэффициентов анизотропии характеристик пластичности (рис. 3,б). Коэффициенты анизотропии предела прочности и условного предела текучести уменьшаются в 4,81 и 2,28 раза по сравнению с исходными значениями.

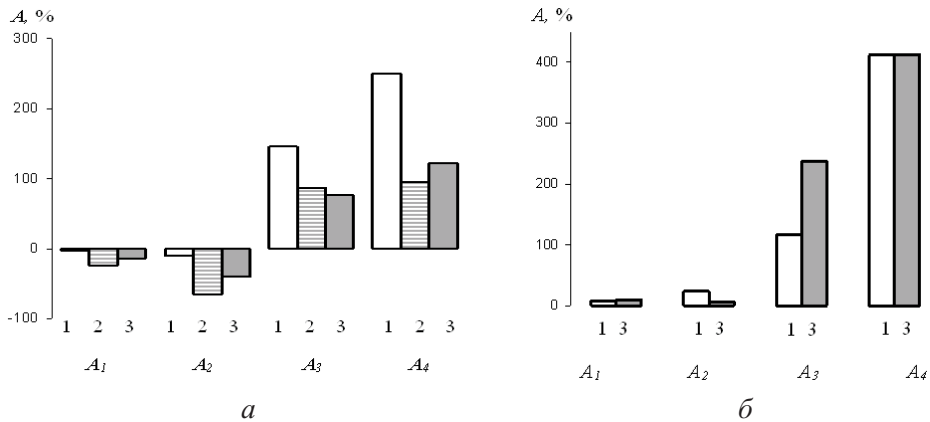


Рис. 3. Анизотропия механических характеристик рельса после наработки на прямом участке (а) и в повороте пути (б): 1 – без действия ИЭТ; 2, 3 – действие ИЭТ по режимам 1 и 2 соответственно.

При действии ИЭТ на образцы рельсовой стали до эксплуатации коэффициенты анизотропии предела прочности уменьшается в 1,14 раза, условного предела текучести – в 1,27 раза и относительного удлинения – в 1,17 раза. Коэффициент анизотропии относительного поперечного сужения после разрыва увеличивается в 1,25 раза. Степень анизотропии характеристик прочности рельсовой стали после наработки на прямом участке под действием ИЭТ повышается, в то время как характеристик пластичности – уменьшается. При испытаниях по режиму 1 коэффициенты анизотропии предела прочности и условного предела текучести увеличиваются в 9,88 и 6,26 раза, а относительного удлинения и относительного сужения уменьшаются в 1,66 и 2,65 раза. При испытаниях по режиму 2 характер анизотропии механических свойств аналогичен. Коэффициенты анизотропии прочности A_1 и A_2 увеличиваются в 5,56 и 3,89 раза, а пластичности A_3 и A_4 уменьшаются в 1,80 и

2,04 раза соответственно. Значения условного предела текучести образцов, вырезанных вдоль и поперек направления прокатки, из рельса после длительной наработки в повороте пути в условиях действия ИЭТ при постоянной нагрузке становятся близкими, при этом значение коэффициента анизотропии уменьшается в 4,50 раза. Коэффициенты анизотропии предела прочности и относительного удлинения возрастают в 1,23 и 2,04 раза, а анизотропия относительного сужения после разрыва практически не изменяется по сравнению со значениями, определенными без действия ИЭТ.

Выводы

1. При эксплуатации рельсов на различных участках пути повышаются значения характеристик прочности материала головки в поперечном направлении и практически не изменяются в продольном.

2. Воздействие ИЭТ на образцы рельсовой стали после наработки приводит к изменению механических характеристик материала, величина и характер которых зависят от условий эксплуатации, направления вырезки образцов, режима действия ИЭТ.

3. Исходная прямая анизотропия характеристик прочности неэксплуатировавшегося рельса в результате действия эксплуатационных нагрузок на прямом участке пути изменяется на обратную, при эксплуатации рельсов в повороте пути ее характер не изменяется. Воздействие ИЭТ на материал рельса до укладки в путь приводит к уменьшению коэффициентов анизотропии механических свойств, а после длительной наработки – к существенному увеличению степени анизотропии характеристик прочности и уменьшению анизотропии характеристик пластичности.

Резюме

Представлено результати досліджень впливу імпульсів електричного струму значної густини на механічні характеристики рейкових сталей у вихідному стані та після тривалої експлуатації. Показано вплив умов навантаження при експлуатації і режимів дії імпульсів електричного струму на механічні характеристики сталі та їх анізотропію.

1. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. – М.: Транспорт, 1997. – 326 с.
2. Фришман М. А. Как работает путь под поездами. – М.: Транспорт, 1983. – 168 с.
3. Пашолок И. Л., Харитонов В. Б. О возможном повышении износостойкости железнодорожных колес // Вест. ВНИИЖТ. – 1997. – № 1. – С. 32 – 36.
4. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействий электромагнитных полей. – Киев: Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008. – 507 с.

5. Троицкий О. А., Баранов Ю. В., Авраамов Ю. С., Шляпин А. Д. Физические основы и технологии обработки современных материалов. Теория, технология, структура и свойства. В 2 т. – М.: Ин-т компьютерных исследований, 2004. – 590 с.
6. Новогрудський Л. С., Оправхата М. Я., Зайцева Л. В. Особливості механічного стану рейок з урахуванням дії силового поля і електричного струму // Вісн. Східноукраїнського національного ун-ту ім. Володимира Даля. – 2007. – **114**, №8. – Ч. 2. – С. 165 – 168.
7. ГОСТ 18267-82. Рельсы железнодорожные типов Р50, Р65 и Р75 широкой колеи, термообработанные путем объемной закалки в масле. Технические условия. – Введ. 01.01.84.
8. Микляев П. Г., Фридман Я. Б. Анизотропия механических свойств металлов. – М.: Metallurgia, 1986. – 224 с.
9. Адамеску Р. А., Гельд П. В., Митюшов Е. А. Анизотропия физических свойств металлов. – М.: Metallurgia, 1985. – 136 с.
10. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С. Анизотропия механических характеристик стали при воздействии импульсов электрического тока и криогенных температур // Пробл. прочности. – 1995. – № 10. – С. 42 – 48.
11. ГОСТ 24182-80. Рельсы железнодорожные широкой колеи типов Р75, Р65 и Р50 из мартеновской стали. – Введ. 01.07.81.

Поступила 08. 07. 2009