

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

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

*Представлены результаты экспериментального исследования влияния электрического тока на механические характеристики рельсовой стали в исходном состоянии и после длительной эксплуатации в интервале температур 293...213 К.*

**Ключевые слова:** механические характеристики, импульсный электрический ток, рельсовая сталь, температура.

За последние годы существенно выросли скорости движения составов, мощность электровозов и моторных вагонов поездов, эксплуатируемых на железных дорогах. С одной стороны такое повышение является экономически выгодным, поскольку увеличиваются объемы перевозок, осуществляемых подвижным составом. С другой, оно ведет к росту уровней действующих на рельсовый путь нагрузок, что может повлечь за собой увеличение эксплуатационных расходов.

Кроме повышения силового воздействия на рельсовые нити от колес подвижного состава, растет и уровень потребляемого тяговым устройством электрического тока. Поскольку на электрифицированном железнодорожном транспорте рельсовые нити выступают в качестве провода электроснабжения, обеспечивая прохождение электрического тока к силовым агрегатам тягового устройства, и обратным проводом при возврате на подстанцию токов рекуперации, то увеличивается и уровень токового воздействия на рельсовый материал. Замыкание электрической цепи питания подвижных тяговых единиц происходит через зону контакта колесо-рельс. В результате контактного циклического взаимодействия колеса с рельсом материал обоих тел находится в условиях объемного напряженного состояния. Уровень напряжений в контактной зоне при различных условиях взаимодействия пары колесо-рельс может достигать значений 0,6...1,5 предела текучести рельсовой стали [1]. Характер действия электрического тока в контакте близок к импульсному. Параметры импульса обусловлены режимом движения подвижного состава: время действия (длительность импульса) – скоростью движения, а потребляемая величина тока (амплитуда импульса) – режимом работы тягового элемента. Суммарное действие силовой нагрузки и электрического тока больших плотностей на высоконагруженные объемы металла конструктивных элементов системы электроснабжения рельсового транспорта, которая объединена с рельсовым полотном, может существенно изменить их физико-механические свойства, способность сопротивляться деформированию и разрушению.

Многочисленными исследованиями по изучению влияния электромагнитного воздействия на механическое поведение металлических

материалов в широком температурном диапазоне [2,3] показано, что действие электрического тока большой плотности ведет к изменению сопротивления деформированию и разрушению металлов. Характер и степень такого изменения зависят от класса материала, параметров воздействия, температуры и т. д. Эти изменения могут быть связаны с действием пондеромоторных сил, тепловым разогревом, вызванным действием электрического тока, неравномерностью распределения плотности импульсного электрического тока по сечению образца (скин-эффект), а также электропластической деформацией.

Для установления степени изменения прочности и пластичности рельсовой стали было проведено исследование влияния импульсного электрического тока на ее механические характеристики при температурах 293, 253, 233, 213 К. Исследования проводили на пятикратных цилиндрических образцах, вырезанных из нового рельса и рельса с наработкой типа Р65 в продольном направлении. Выбор вида механических испытаний, а именно статическое растяжение цилиндрических образцов [4], обоснован тем, что разделение рельсов по категориям качества осуществляют по уровню характеристик прочности материала готовых рельсов. Вырезку образцов производили в соответствии с требованиями [5], регламентирующими выполнение механических испытаний при приемосдаточном контроле рельсов на предприятиях изготовителях. При проведении исследований часть образцов подвергали воздействию импульсов электрического тока (ИЭТ) плотностью  $J = 255 \text{ MA/m}^2$  и длительностью  $\tau = 10^{-2} \text{ с}$ . Вектор плотности ИЭТ был ориентирован вдоль оси образца.

Для большей наглядности анализ изменения механических характеристик исследуемой рельсовой стали проводили в относительном виде, сравнивая изменения значения характеристики в результате действия некоторого фактора (ИЭТ или температуры) с ее исходными значениями. Например, степень изменения предела прочности стали под действием ИЭТ при температуре 293 К определяли из выражения

$$k_1 = \frac{\sigma_{\epsilon}^{\text{ИЭТ}} - \sigma_{\epsilon}}{\sigma_{\epsilon}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

а его изменение в результате понижения температуры –

$$k'_1 = \frac{\sigma_{\epsilon}^T - \sigma_{\epsilon}^{293}}{\sigma_{\epsilon}^{293}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Соотношением такого же вида оценивали совместное действие ИЭТ и температуры

$$k''_1 = \frac{\sigma_{\epsilon}^{T \text{ ИЭТ}} - \sigma_{\epsilon}^T}{\sigma_{\epsilon}^T} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $T = 293, 253, 233, 213 \text{ К}$  – температура испытаний.

При анализе результатов испытаний, проведенных при температуре 293 К, было установлено, что значения механических характеристик исходного материала незначимо отличаются от аналогичных характеристик, полученных при действии ИЭТ (рис. 1). Это связано с тем обстоятельством, что полученные уровни изменений характеристик лежат в поле естественного рассеяния их значений.

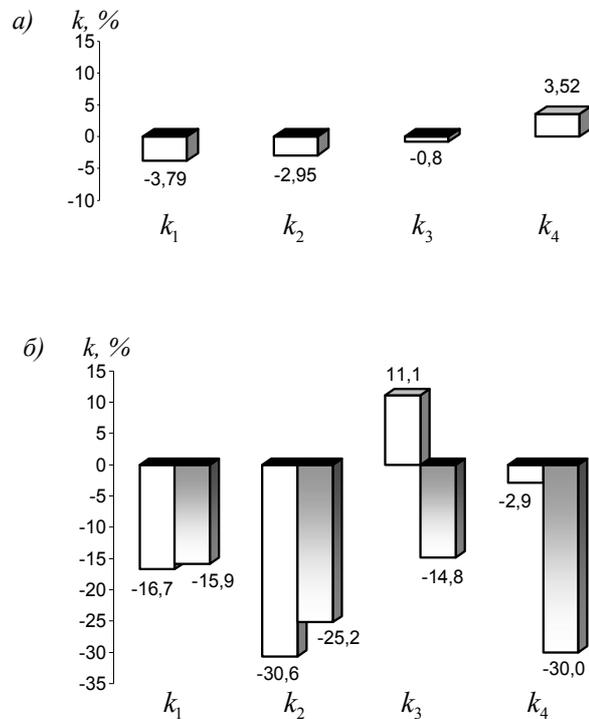


Рис. 1. Относительное изменение механических характеристик рельсовой стали в исходном состоянии (а) и после наработки (б) при действии ИЭТ при температуре 293 К. Обозначения: светлые столбцы – при ступенчатом режиме действия ИЭТ; темные столбцы – действие серии ИЭТ при постоянной нагрузке;  $k_1, k_2, k_3,$  и  $k_4$  – изменения механических характеристик  $\sigma_e, \sigma_{0.2}, \delta$  и  $\Psi$  соответственно.

В результате действия ИЭТ на образцы материала с наработкой происходит существенное изменение значений его характеристик прочности и пластичности. Так, при действии ИЭТ в процессе активного нагружения образцов (первый импульс на уровне  $0,3 \cdot P_{0.2}$  с дальнейшим шагом, равным  $0,1 \cdot P_{0.2}$ ) происходит уменьшение прочностных характеристик (рис. 1,б). Значение предела прочности снижается на 17%, а условного предела текучести – на 31%. Воздействие ИЭТ на образцы в этом режиме приводит к увеличению относительного остаточного удлинения на 11% и практически не влияет на уровень относительного сужения поперечного сечения образцов. При действии серии импульсов электрического тока в условиях постоянной нагрузки на уровне  $0,6 \cdot P_{0.2}$  характер изменения механических характеристик

рельсовой стали такой же, как и в предыдущем случае: предел прочности уменьшается на 16%, а условный предел текучести – 25%. В отличие от первого режима, действие ИЭТ при постоянной нагрузке приводит к уменьшению относительного остаточного удлинения образца на 15%, а уровня относительного сужения поперечного сечения на 30%.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты указывают на низкую чувствительность рельсовой стали в исходном состоянии к воздействию ИЭТ большой плотности при комнатной температуре. Механическая наработка значительно усиливает влияние ИЭТ на изменение механических характеристик рельсовой стали, приводя к их значительному уменьшению.

Для исходного состояния исследуемой стали понижение температуры испытаний от 293 до 213 К несущественно влияет на изменение характеристик прочности. Это изменение не превышает 8% (рис. 2,а). В то же время снижение температуры испытаний материала рельса с наработкой приводит к значительным изменениям механических характеристик. При понижении температуры испытаний до 253 К снижение предела прочности стали составляет 18%, а условного предела текучести – 28%. Последующее охлаждение до 213 К приводит к некоторому упрочнению материала.

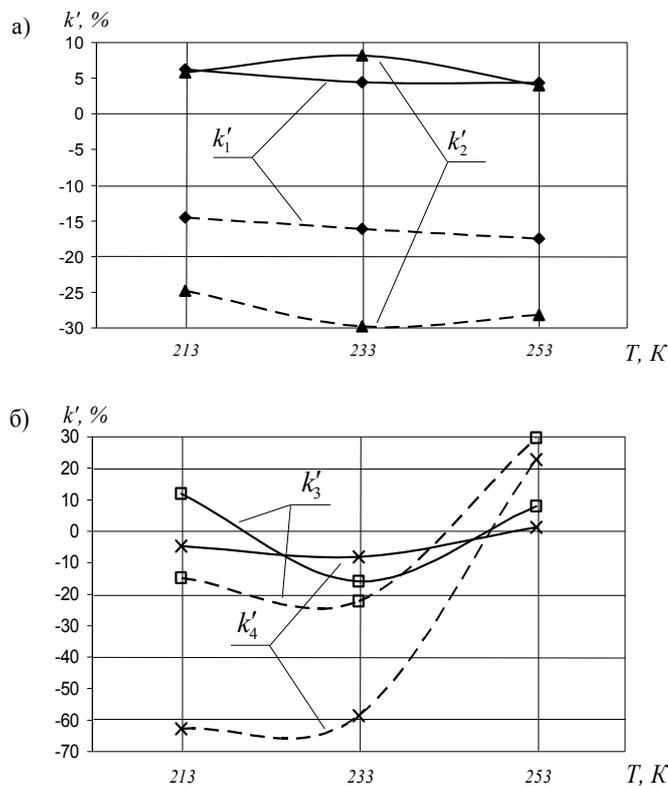


Рис. 2. Температурные зависимости характеристик прочности (а) и пластичности (б) рельсовой стали. Обозначения: — — значение характеристик для исходного рельсового материала; - - - значение характеристик для материала с наработкой;  $T$  – температура испытаний;  $k_1'$ ,  $k_2'$ ,  $k_3'$  и  $k_4'$  см. на рис. 1.

Температурные зависимости изменения характеристик пластичности для обоих случаев механического состояния рельсовой стали имеют сходный характер (рис. 2,б). Следует отметить, что при понижении температуры от 293 до 253 К характеристики пластичности возрастают, а при охлаждении до более низких температур их значения значительно снижаются. Так, для исходного состояния материала при температурах 253 и 213 К по сравнению с аналогичными характеристиками при 293 К происходит некоторое увеличение относительного остаточного удлинения образца и его снижение при температуре 233 К. Для материала с наработкой при 253 К также наблюдается прирост  $\delta$  на 30%, но с дальнейшим резким спадом его уровня (на 22...15%) при понижении температуры испытаний до 233 К и ниже.

Относительное сужение площади поперечного сечения образца после разрыва для материала с наработкой увеличивается на 23% при температуре 253 К и снижается на 63% при достижении температуры 213 К. Для исходного состояния материала изменение характеристик пластичности при понижении температуры испытаний не превышает 12% от значений, полученных при комнатной температуре, то есть рельсовая сталь в исходном состоянии мало чувствительна к понижению температуры испытаний от 293 К до 213 К. В то же время рельсовый материал с наработкой существенно изменяет свои механические характеристики при охлаждении до 213 К.

При сопоставлении данных о механическом поведении стали в интервале температур от 293 до 213 К и действии ИЭТ установили, что наибольшее влияние ИЭТ на характеристики прочности рельсовой стали оказывают при комнатной температуре. Как уже отмечалось ранее (см. рис. 1,б), действие ИЭТ при такой температуре приводит к значительному снижению предела прочности и условного предела текучести материала (рис.3,а). С понижением температуры испытаний от 293 до 213 К степень влияния ИЭТ на характеристики прочности уменьшается: от 16 до 3% для предела прочности и от 25 до 3% для условного предела текучести.

Действие ИЭТ при температуре ниже комнатной приводит к росту значений характеристик пластичности стали с наработкой по сравнению с их значениями при температуре 293 К. Температурные зависимости изменения характеристик пластичности носят немонотонный характер (рис. 3,б), достигая экстремальных значений при температуре 233 К: 57 и 107% для  $\delta$  и  $\psi$  соответственно.

**Выводы.** В результате проведенных исследований выявлено существенное влияние наработки на механические характеристики рельсовой стали.

Воздействие импульсов электрического тока на образцы рельсовой стали в интервале температур от 293 до 213 К приводит к изменению ее механических характеристик, причем это изменение – неоднозначно: практически не чувствителен к действию импульсов электрического тока материал рельса в исходном состоянии, однако существенно изменяются значения его характеристик прочности (например,  $\sigma_B$  до 16 %) и пластичности при действии ИЭТ после наработки.

Понижение температуры испытаний от 293 до 213 К незначительно влияет на уровень механических характеристик рельсовой стали в исходном

состоянии, существенно изменяя их значения, определенные на образцах после наработки.

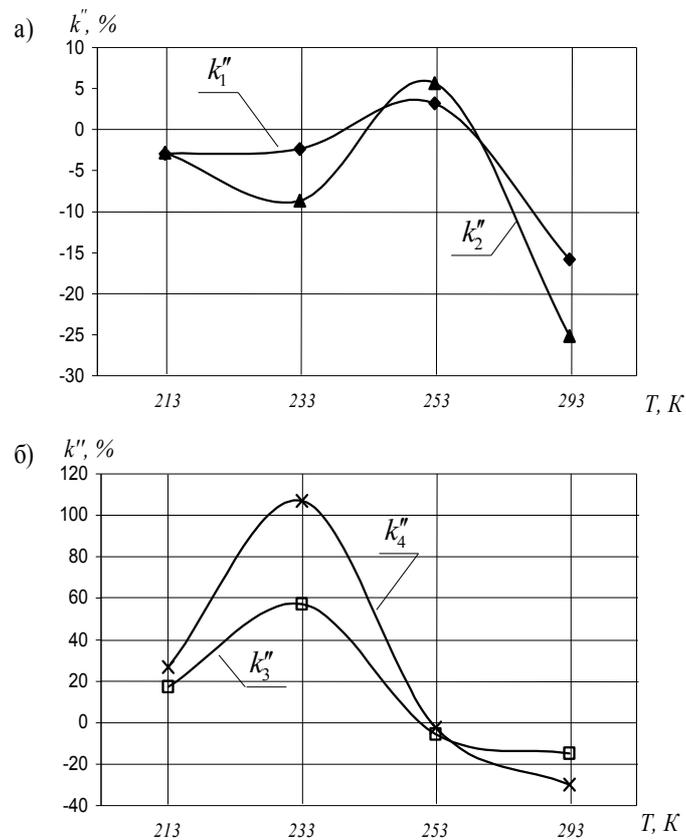


Рис. 3. Относительное изменение характеристик прочности (а) и пластичности (б) рельсовой стали с наработкой при воздействии ИЭТ  $k_1''$ ,  $k_2''$ ,  $k_3''$  и  $k_4''$  см. на рис. 1.

### Summary

In the paper presents the results of experimental investigation of the influence of the electric current on mechanical characteristics of rail steel in initial state and after long-term service in the interval temperatures 293...213 K.

**Keywords:** mechanical characteristics, pulsed electric current, rail steel, temperature.

## Резюме

Представлено результати експериментального дослідження впливу електричного струму на механічні характеристики рейкової сталі в вихідному стані і після тривалої експлуатації в інтервалі температур 293...213 К.

**Ключові слова:** механічні характеристики, імпульсний електричний струм, рейкова сталь, температура.

1. Пашалок И. Л., Харитонов В. Б. О возможном повышении износостойкости железнодорожных колес // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. – № 1. – С. 32 – 36.
2. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействий электромагнитных полей. – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины. 2008 – 507 с.
3. 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.: Институт компьютерных исследований, 2004. – Т.1 – 590 с.
4. ГОСТ 1497 – 84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 01.10.1985 г.
5. ГОСТ 18267–82 Рельсы железнодорожные типов Р50, Р65 и Р75 широкой колеи, термообработанные путем объемной закалки в масле. Технические условия. Введ. 01.01.1984 г.

Поступила 30.06.2009