

О предельном состоянии перлитной стали М76 при действии электрического тока

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

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

Предложен и обоснован критерий оценки предельного состояния рельсовой стали при действии импульсов электрического тока. В качестве критерия предельного состояния предлагается использовать условие равенства значений условного предела текучести циклически наработанного материала при последующем действии импульсов электрического тока и минимального уровня предела текучести стали, указанного в нормативных документах.

Ключевые слова: циклическое нагружение, предельное состояние, характеристики прочности, допустимые напряжения, импульсы электрического тока.

Введение. Подавляющее большинство элементов машин и конструкций в процессе эксплуатации испытывают действие циклических знакопеременных нагрузок, температуры, коррозионной среды и т.п. Действие эксплуатационных факторов может существенно изменить характер поведения материала, его механические свойства, способность сопротивляться деформированию и разрушению, ресурсные показатели [1, 2]. Обеспечение работоспособности несущих элементов в соответствии с конкретными условиями является комплексной задачей по выбору материалов, конструкции, оптимизации режимов работы и других факторов, которые бы удовлетворяли большинству эксплуатационных требований.

Для непрерывного и надежного функционирования линий железнодорожного транспорта рельсовая колея, как одна из основных составляющих железнодорожного пути, должна удовлетворять требованиям прочности и устойчивости в работе, иметь максимально возможную долговечность и высокую усталостную прочность. Недолговечность рельсовой колеи в основном обусловлена сложным суммарным действием на нее циклических силовых нагрузок, контактным взаимодействием, тяговым электрическим током большой плотности, природно-климатическими условиями, а также условиями содержания и техническим состоянием железнодорожных путей. Постоянное увеличение объемов перевозок, осуществляемых железнодорожным транспортом, грузонапряженности, осевых нагрузок неизбежно еще больше усложнит условия работы высоконапряженных элементов такой конструкции и повлияет на выход из строя рельсов из-за повреждений. Долговечность рельсов зависит от конструкции, плана и профиля пути, нагрузки от колесных пар, типа и качества рельсов и других факторов. При эксплуатации несущая способность рельсов снижается вследствие срабатывания головки, коррозии подошвы, старения и накопления остаточных деформаций в металле и т.п. В результате появляются повреждения, дефекты, которые, несмотря на достаточный запас прочности материала рельсов, приводят к необходимости снижения нагруженности пути и скорости движения вплоть до полной его остановки. Средний уровень наработки рельсов отечественного производства составляет ~ 500 млн. брутто-тонн, в то время как зарубежные образцы (рельсы производства Японии, Австрии и Франции) более чем в два раза превышают этот показатель.

Оценка долговечности несущих элементов конструкции может основываться на использовании методов экспериментального и расчетного определения предельного состояния образцов материала и ее натуральных элементов [3]. В инженерной практике

расчет на прочность сводится к определению значений наибольших местных напряжений в опасной точке и сравнению их с допускаемыми.

При расчетах на прочность несущих элементов рельсового пути для определения значений допускаемых напряжений [4, 5] используются характеристики статической прочности стали в исходном состоянии. В то же время установлено [6–8], что в сталях ферритно-перлитного класса под действием циклической нагрузки, начиная с первого цикла, во всем объеме или в отдельных объемах материала происходят структурные изменения: разрушение перлитной структуры и цементита, что приводит к изменению его механических свойств. Полученные ранее [9, 10] экспериментальные данные свидетельствуют о существенном влиянии на механические свойства перлитной стали такого эксплуатационного фактора, как электрический ток большой плотности. Неучет при расчетах на прочность возможных изменений значений характеристик статической прочности рельсовой стали из-за действия в процессе эксплуатации циклических нагрузок и электрического тока может внести существенные погрешности в оценку предельного состояния железнодорожного пути. В связи с этим возникает необходимость разработки подходов, позволяющих количественно оценить эксплуатационную стойкость и надежность работы рельсов в условиях циклического нагружения.

Целью настоящей работы является установление критерия оценки предельного состояния перлитной стали при действии электрического тока с учетом цикличности ее нагружения при эксплуатации в рельсовом пути.

Методика исследования. В качестве объекта исследований выбрана сталь перлитного класса М76 производства ПАО МК “АЗОВСТАЛЬ”. Для моделирования в лабораторных условиях циклической наработки стали пятикратные цилиндрические образцы диаметром рабочей части 4 мм вырезали из рельса согласно требованиям нормативных документов по контролю качества готовых рельсов [11] и подвергали повторно-статическому нагружению при одноосном растяжении (рис. 1).

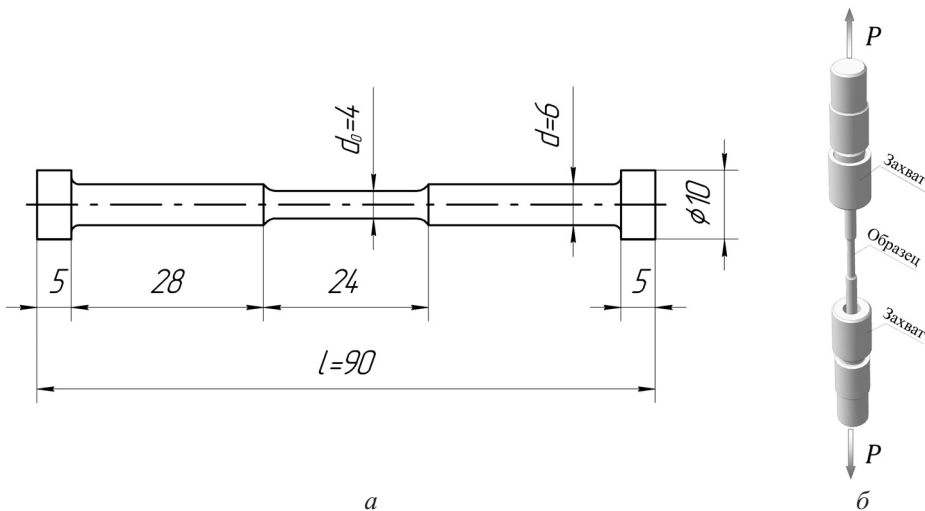


Рис. 1. Цилиндрические образцы для испытаний (а) и схема циклического нагружения образцов при растяжении (б).

Наработка рельсовой стали осуществлялась на базе до 10^6 цикл с частотой нагружения 10 Гц в области упругих деформаций. Параметры цикла нагружения выбирали из условия равенства максимальных и минимальных напряжений цикла действующим напряжениям в рельсе:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \sigma_{\text{ост}} + \sigma_T + \sigma_{\text{ц}}; \\ \sigma_{\min} &= \sigma_{\text{ост}},\end{aligned}\quad (1)$$

где $\sigma_{\text{ост}}$ – остаточные напряжения; σ_T – температурные напряжения; $\sigma_{\text{ц}}$ – максимальные значения циклических напряжений при эксплуатации рельса.

По реальным оценкам [12] значения $\sigma_{\max} = 300$ МПа, $\sigma_{\min} = 90$ МПа, т.е. коэффициент асимметрии цикла $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0,3$. Получение сопоставимых результатов испытаний образцов наработанного в лабораторных условиях рельсового материала обеспечивали проведением нагружения при постоянных синусоидальной форме цикла с частотой 10 Гц, уровне средних напряжений $\sigma_m = 195$ МПа и значениями коэффициента асимметрии цикла 0,3. После циклической наработки цилиндрических образцов растягивающей нагрузкой до определенного числа циклов проводили испытания в условиях одноосного статического растяжения в соответствии с требованиями [13].

При испытаниях часть образцов при напряжении $0,6\sigma_{0,2}$ ($\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести рельсовой стали) подвергали воздействию импульсов электрического тока (ИЭТ), направляемых вдоль их оси. Параметры электрического тока выбирали в соответствии с предварительными оценками величины потребляемого локомотивами тягового тока и характером его действия на рельсы в пути [12, 14–16]. Плотность тока базового импульса составляет $j = 255$ МА/м², длительность $\tau = 10^{-2}$ с. Для всех образцов обеспечивали идентичность параметров импульсов электрического тока. Приведенные ниже значения механических характеристик получены при усреднении данных испытаний в идентичных условиях не менее трех образцов.

Результаты и их обсуждение. Прочность рельсового пути оценивают, прежде всего, по прочности основного несущего элемента верхнего строения пути, т.е. по прочности рельсов, при сравнении расчетных напряжений в рельсах с их допускаемыми значениями. Для оценки уровня напряженности в поперечном сечении рельса под колесом подвижного состава условие прочности записывается в виде [4, 5]

$$\sigma_{\Gamma-к} \leq [\sigma]_p, \quad \sigma_{\Pi-к} \leq [\sigma]_p. \quad (2)$$

Здесь $\sigma_{\Gamma-к}$ и $\sigma_{\Pi-к}$ – напряжения от изгиба и кручения в кромках головки и подошвы рельса; $[\sigma]_p$ – допускаемое расчетное напряжение для рельсов,

$$[\sigma]_p = \frac{\sigma_{0,2}^{\Gamma} - \sigma_T}{n}, \quad (3)$$

где $\sigma_{0,2}^{\Gamma}$ – гарантированный предел текучести рельсовой стали; n – коэффициент запаса прочности.

Согласно положениям нормативных документов [4, 5], при расчете железнодорожных рельсов на прочность за опасное напряжение принимают гарантированный предел текучести рельсовой стали $\sigma_{0,2}^{\Gamma}$ с учетом уровня вероятности $\Phi = 0,999$, который является расчетной величиной и определяется из выражения

$$\sigma_{0,2}^{\Gamma} = \bar{\sigma}_{0,2} - \lambda_{\Phi} S_{\sigma_{0,2}}, \quad (4)$$

где $\bar{\sigma}_{0,2}$ – среднее значение условного предела текучести материала, определяемое по результатам испытаний не менее трех цилиндрических образцов; $S_{\sigma_{0,2}}$ – средне-

квадратичное отклонение значения $\sigma_{0,2}$; $\lambda_{\Phi} = 3,0$ – нормирующий множитель для заданного уровня вероятности $\Phi = 0,999$ [5].

Допускаемые расчетные напряжения для рельсов железнодорожного пути определяют с использованием выражения (3), при этом величину n полагают равной 1,3. В случае наработки рельсами выше нормативного тоннажа коэффициент запаса прочности n принимают равным 1,4 [4]. В соответствии с нормативными документами для климатических условий Украины для рельсов бесстыкового пути температурные напряжения $\sigma_T = 70$ МПа [4].

С использованием методики определения допускаемых напряжений в элементах пути и полученных экспериментальных данных по механическим характеристикам рельсовой стали [9, 17] рассчитаны допускаемые напряжения для материала рельса до и после эксплуатации в пути без и при действии ИЭТ. С помощью соотношений (3) и (4) были определены значения гарантированного предела текучести рельсовой стали и допускаемых расчетных напряжений (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Значения гарантированного предела текучести стали М76 и допускаемые расчетные напряжения

Состояние материала	Условия проведения испытаний	$\bar{\sigma}_{0,2}$, МПа	$S_{\sigma_{0,2}}$, МПа	$\sigma_{0,2}^r$, МПа	$[\sigma]_p$, МПа
Требования ДСТУ 4344:2004	–	740	50	590	400
До эксплуатации	Без действия ИЭТ	881	60	701	485
	При действии ИЭТ	796	75	571	385
После эксплуатации	Без действия ИЭТ	806	10	776	504
	При действии ИЭТ	603	50	453	274

Из данных табл. 1 следует, что значения допускаемых расчетных напряжений при действии ИЭТ уменьшаются в зависимости от состояния стали. Для материала ненаработанного рельса эти значения уменьшаются на ~4%, после эксплуатации – на 31%.

Для установления функциональной зависимости прочности рельсовой стали от степени предварительной циклической наработки в лабораторных условиях были проведены специальные исследования [18]. По полученным результатам в полуположительных координатах построены зависимости характеристик статической прочности стали от числа циклов нагружения (рис. 2).

Зависимость изменения прочности стали от числа циклов предварительного нагружения N без и при действии ИЭТ можно аналитически описать с помощью уравнения вида $f(x) = ae^{-bx}$, которое для условного предела текучести имеет вид

$$\sigma_{0,2}(N) = \sigma_{0,2} e^{-bN}, \quad (5)$$

где b – параметр уравнения аппроксимации, характеризующий угол наклона касательной к графику функции; $\sigma_{0,2}$ – значение условного предела текучести стали до начала циклического нагружения.

Исходя из полученных данных предельное состояние рельсовой стали при ее длительной эксплуатации в электрифицированном пути целесообразно устанавливать по равенству значения условного предела текучести наработанного материала

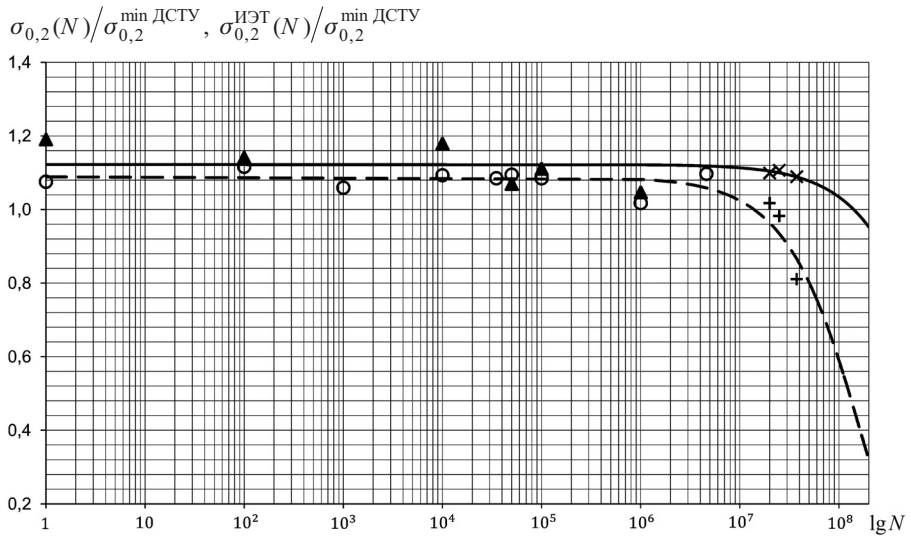


Рис. 2. Определение предельного состояния материала рельсов при действии ИЭТ: сплошная линия, \blacktriangle , \times – без действия ИЭТ; штриховая линия, \circ , $+$ – при действии ИЭТ (\times , $+$ – значения $\sigma_{0,2}$, полученные для образцов, вырезанных из рельса после эксплуатации*).

$\sigma_{0,2}(N)$ минимальному уровню предела текучести стали, указанному в нормативных документах $\sigma_{0,2}^{\min \text{ ДСТУ}}$:

$$\sigma_{0,2}(N), \sigma_{0,2}^{\text{ИЭТ}}(N) = \sigma_{0,2}^{\min \text{ ДСТУ}}, \quad (6)$$

где $\sigma_{0,2}(N)$, $\sigma_{0,2}^{\text{ИЭТ}}(N)$ – условный предел текучести стали после наработки без и при действии ИЭТ соответственно.

Тогда с учетом (5) получим

$$\sigma_{0,2} e^{-bN} = \sigma_{0,2}^{\min \text{ ДСТУ}}. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) относительно числа циклов нагружения дает возможность определить предельное число циклов нагружения $N_{\text{пр}}$, соответствующее наступлению предельного состояния стали:

$$N_{\text{пр}} = \frac{1}{b} \ln \left[\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2}^{\min \text{ ДСТУ}}} \right], \quad (8)$$

при действии ИЭТ имеем

$$N_{\text{пр}}^{\text{ИЭТ}} = \frac{1}{b} \ln \left[\frac{\sigma_{0,2}^{\text{ИЭТ}}}{\sigma_{0,2}^{\min \text{ ДСТУ}}} \right], \quad (9)$$

где $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{0,2}^{\text{ИЭТ}}$ – условный предел текучести стали без и при действии ИЭТ до эксплуатации.

* Рельс после эксплуатации на Шепетовском участке Цвитоха–Славута электрифицированного пути Юго-Западной железной дороги. Суммарное количество пропущенного тоннажа за время эксплуатации рельса в пути составило около 900 млн. брутто-тонн.

Т а б л и ц а 2

Значения предельного числа циклов нагружения рельсовой стали

Условие проведения испытаний	$\sigma_{0,2}$, МПа	$N_{пр}$, цикл	Q , млн. брутто-тонн
Без действия ИЭТ	881	$8,664 \cdot 10^7$	1040
При действии ИЭТ	796	$8,536 \cdot 10^6$	103

Согласно результатам расчета (табл. 2) предельное состояние рельсовой стали при действии ИЭТ наступает при $N_{пр}^{ИЭТ} = 8,536 \cdot 10^6$ цикл, что практически на порядок меньше предельного числа циклов нагружения без действия тока ($N_{пр} = 8,664 \cdot 10^7$ цикл).

Приняв за величину осевой нагрузки $P_{ос}$, действующей на колесную пару подвижного состава, ее среднее значение, характерное для железных дорог Украины и Западной Европы, а именно: 24 тонны на ось, можно оценить предельный условный объем тоннажа Q : $Q = P_{ос} N_{пр} / 2$ (табл. 2).

Таким образом, уменьшение значений характеристик прочности стали при действии исследованных эксплуатационных факторов приводит к возникновению пластической деформации материала рельса при меньших уровнях эксплуатационных нагрузок и, как следствие, к преждевременному появлению в материале головки рельса наклепанного слоя, наплывов, а также к зарождению поверхностных и внутренних микродвигов и микротрещин. При действии ИЭТ расчетный срок службы рельсовой стали сокращается в десять раз по сравнению с таковым стали без ИЭТ.

Выводы

1. Исследовано влияние ИЭТ на механические характеристики предварительно циклически наработанной в условиях одноосного растяжения и плоского изгиба рельсовой стали.

2. Установлено, что степень влияния ИЭТ на характеристики прочности стали зависит от числа циклов нагружения, экспоненциально увеличиваясь с их ростом.

3. Показано, что при определенном числе циклов предварительного нагружения значение характеристик прочности рельсовой стали при действии ИЭТ уменьшается и достигает величин, установленных нормативными документами как минимально допускаемые, что предлагается использовать в качестве критерия оценки предельного состояния рельсовой стали как без, так и при действии ИЭТ.

Резюме

Запропоновано та обґрунтовано критерій оцінювання граничного стану рейкової сталі при дії імпульсів електричного струму. Як критерій граничного стану пропонується використовувати умову рівності значень умовної границі плинності циклічно напрацьованого матеріалу за подальшої дії імпульсів електричного струму і мінімального рівня границі плинності сталі, указаного в нормативних документах.

1. *Стрижало В. А.* Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. – Киев: Наук. думка, 1978. – 240 с.
2. *Троценко В. Т.* Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 344 с.

3. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие / Под ред С. В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
4. Даниленко Е. І., Рибкін В. В. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. – Київ: Транспорт України, 2004. – 69 с.
5. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с.
6. Изотов В. И., Поздняков В. А., Лукьяненко Е. В. и др. Эволюция дислокационной структуры и образование микротрещин при усталости перлитно-ферритной стали // Физика металлов и металловедение. – 2008. – **105**, № 5. – С. 549 – 559.
7. Саврай Р. А., Макаров А. В., Табатчикова Т. И. и др. Особенности поведения перлита различной морфологии при циклическом растяжении // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 5. – С. 15 – 20.
8. Изотов В. И., Гетьманов М. Е., Буржанов А. А. и др. Влияние структуры перлитной стали на механические свойства и особенности разрушения при изгибном нагружении // Физика металлов. – 2009. – **108**, № 6. – С. 638 – 648.
9. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Оправхата Н. Я. Влияние электрического тока на механические характеристики рельсовой стали // Пробл. прочности. – 2010. – № 4. – С. 145 – 153.
10. Новогрудский Л. С., Оправхата Н. Я. Механические характеристики рельсовой стали при воздействии электрического тока // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2009. – № 32. – С. 120 – 126.
11. ДСТУ 4344:2004. Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні умови. – Чинний з 10.01.2005.
12. Новогрудский Л. С., Оправхата Н. Я., Зайцева Л. В. Особливості механічного стану рейок з урахуванням дії силового поля і електричного струму // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2007. – **114**, № 8. – Ч. 2. – С. 165 – 168.
13. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытания на растяжение (ISO 6892-84, СТ СЭВ 471–88). – Введен 01.01.86.
14. Тушканов Б. А., Пушкарев Н. Г., Позднякова Л. А. и др. Электровоз ВЛ85. Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1992. – 480 с.
15. Электрические железные дороги: учебник / Под ред. В. П. Феоктистова, Ю. Е. Просвинова. – Самара: СамГАПС, 2006. – 312 с.
16. Харрис У. Дж., Захаров С. М., Ландгрен Дж. и др. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / Пер. с англ. под ред. С. М. Захарова, В. М. Богданова. – М.: Интекст, 2002. – 408 с.
17. Новогрудський Л. С., Оправхата М. Я. Вплив електричного струму на механічні характеристики рейкової сталі // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2008. – **123**, № 5. – Ч. 2. – С. 148 – 152.
18. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Оправхата Н. Я. и др. Экспериментальное исследование влияния предварительного циклического нагружения на характеристики статической прочности рельсовой стали // Междунар. науч.-техн. конф. “Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций” (Киев, 28–31 мая 2013 г.). – Киев, 2013. – С. 286 – 288.

Поступила 08. 04. 2014