

Об оценке механических характеристик рельсовых сталей в условиях эксплуатации

Л. С. Новогрудский, С. З. Стасюк, Н. Я. Оправхата

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

Проведена оценка механического состояния материала нового рельса и рельса после длительной эксплуатации на основании полученных данных о распределении твердости по сечению рельса и рассеянии ее характеристик.

Ключевые слова: остаточные и контактные напряжения, твердость, рассеяние значений характеристик твердости.

Введение. Во время эксплуатации материал высоконагруженных конструкций претерпевает различного рода изменения. При эксплуатации новых изделий происходят процессы приработки деталей с интенсивным износом рабочих поверхностей и приспособляемости верхних слоев материала к режимам работы, температурным режимам и т.д. В ходе такой адаптации в материале отмечаются необратимые структурные изменения, которые, как правило, приводят к повышению его работоспособности [1]. Дальнейшая длительная эксплуатация способствует зарождению и развитию дефектов в материале деталей. Все эти процессы свойственны также материалам системы колесо–рельс.

Структурная неоднородность конструкционного материала до эксплуатации проявляется в разбросе значений его механических характеристик в локальных объемах. Существенная исходная структурная неоднородность материала рельса, вызванная технологическими операциями при его изготовлении (прокатка, термомеханическая обработка всего рельса либо его головки и т.д.), усиливается при эксплуатации. Неоднородность механических свойств конструкционного материала по сечению какого-либо изделия оценивают по распределению значений твердости. При этом анализ неоднородности свойств проводят как на основании прямых значений твердости [2, 3], так и статистических методов [4–6]. Широко используемые на практике подходы позволяют контролировать состояние несущих элементов без существенных затрат и отслеживать накопление повреждений в локальных зонах конструкции, не разрушая ее [4].

При опирании колеса на рельс в центральной части его головки создается объемное напряженное состояние. При влиании поезда зона контакта перемещается к рабочей выкружке. В этом случае возможна реализация двухточечного контакта вследствие взаимодействия гребня колеса с рельсом, в результате чего возникает напряженное состояние, близкое к чистому сдвигу [7]. Действие многих факторов различной природы, влияющих на напряженно-деформированное состояние рельсового полотна, приводит к большому количеству изъятов с пути дефектных и остродефектных рельсов, к их частым

изломам, что особенно опасно для магистралей с ускоренным движением пассажирских и тяжеловесных грузовых поездов.

Значительную роль в работе рельсов играют уровни эксплуатационных нагрузок и остаточных полей напряжений. Проходя все стадии технологического процесса изготовления, рельсы поддаются многим операциям, которые должны повысить их работоспособность. По данным многих исследований [8–10], наибольшие значения остаточных напряжений на этапе изготовления отмечаются после объемной закалки. Ряд последующих операций приводит к существенному снижению уровня напряжений, выравниванию их значений по сечению. Так, до укладки в головке и подошве рельса действуют только растягивающие напряжения, в шейке – сжимающие. После укладки в путь и длительной эксплуатации уровень напряжений возрастает, характер их распределения по сечению изменяется. Продольные напряжения в верхних слоях головки становятся сжимающими и достигают 100...130 МПа, на расстоянии 10–15 мм от поверхности качения значения напряжений нулевые и они переходят в растягивающие. Наибольшее значение для зарождения дефектов имеют напряжения, действующие в плоскости поперечного сечения рельса перпендикулярно его продольной оси. Уровень растягивающих напряжений до укладки составляет 50...100 МПа, после наработки (700 млн. т. груза) он возрастает до 200...250 МПа. Величина сжимающих напряжений достигает 200 МПа [8]. Такой градиент остаточных напряжений на расстоянии 3–13 мм от поверхности качения и боковой грани рабочей выкружки рельса может приводить к появлению дефектов по контактно-усталостному механизму.

Цель работы заключается в оценке механического состояния материала рельсов по результатам сопоставления распределений значений твердости в поперечном сечении и на поверхности качения нового рельса и рельса после наработки, а также их напряженно-деформированного состояния, рассчитанного на основании данных, приведенных в литературных источниках.

Методика проведения исследования. Измерение твердости по сечению головки, шейки в подошве рельса проводили на поперечных темплетях толщиной 50 мм, вырезанных из нового рельса и длительно эксплуатировавшегося в прямом участке пути. Исследуемые рельсы изготавливали из стали М76. Твердость в головке рельса измеряли по линиям, расположенным на расстоянии 10 и 22 мм от поверхности качения, в подошве – на расстоянии 5 и 10 мм от нижней поверхности, в шейке – вдоль оси симметрии и вблизи боковых поверхностей. Каждую линию разбивали на равные отрезки, и в окрестности полученных точек проводили не менее пяти замеров твердости (рис. 1). Значения твердости, полученные в каждой точке, усредняли для дальнейшего анализа. На поверхности качения твердость измеряли по всей ширине поверхности в зонах длиной 50 мм, которые располагались вдоль продольной оси рельса на расстоянии 100 мм друг от друга. Распределение твердости исследовали в поперечном сечении и на поверхности качения нового рельса, а также после длительной эксплуатации (уровень наработки составляет 875 млн. т. брутто для рельса, снятого с прямого участка пути) с использованием твердомера “Темп-4”. Работа прибора базируется на методе, основанном на определении соотношения скоростей падения и отскока удар-

ника. Это соотношение автоматически преобразуется прибором в значение твердости по шкале Бринелля (HB). Погрешность измерения значений твердости не превышает $\pm 3\%$. Выбор шкалы измерений твердости обусловлен в первую очередь требованиями нормативной документации, согласно которой значения твердости для железнодорожных рельсов определяются методом проб по Бринеллю [11].

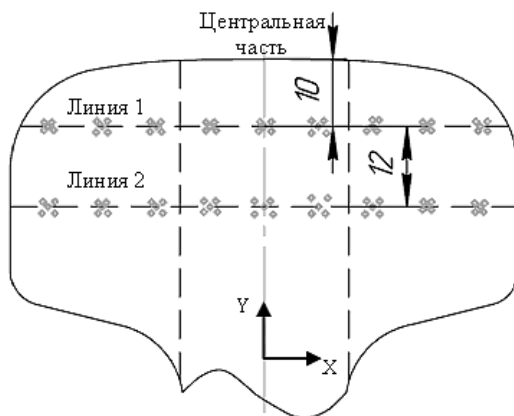


Рис. 1. Схема измерений твердости в головке рельса.

Для оценки напряженного состояния контактной пары колесо–рельс разработали конечноэлементную модель с использованием программного комплекса ANSYS. С целью уменьшения затрат машинного ресурса и времени расчета учитывали симметрию взаимодействующих тел. Расчет проводили для случая статического взаимодействия новых профилей колеса и рельса.

Результаты исследования. По данным измерений построено поле средних значений твердости рельса

$$\overline{HB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n HB_i, \quad (1)$$

начиная с расстояния 10 мм от поверхности качения (рис. 2).

Анализируя полученные данные по распределению средних значений твердости (HB) в поперечном сечении (рис. 2), необходимо отметить следующее. Для нового рельса в шейке значения HB достигают 285 HB с вариацией в интервале 258...303 HB , в подошве – 290 HB при крайних значениях 245 и 319 HB .

Для рельса с наработкой среднее значение твердости в шейке составляет 262 HB при крайних значениях 237 и 282 HB , в подошве – 260 HB при наименьшем (212 HB) и наибольшем (303 HB) значениях. Таким образом, расхождение между средними значениями твердости в шейке и подошве нового рельса составляет $\leq 8\%$, рельса после длительной наработки – 12%. В то же время разница в значениях твердости для правого и левого краев пера подошвы достигает 20 и 28% соответственно (рис. 2,б).

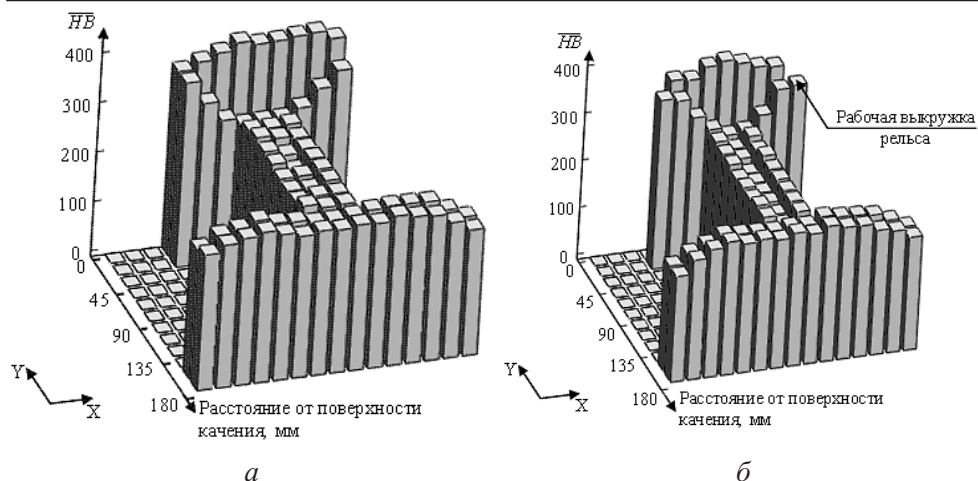


Рис. 2. Средние значения твердости по сечению рельса до укладки в путь (а) и после длительной наработки (б).

В головке рельса сконцентрирован большой объем металла (площадь сечения головки составляет 34% общей площади поперечного сечения рельса), который подвергается сложному воздействию внешних нагрузок и внутренних усилий. От его состояния в значительной степени зависит безопасная работа рельсовых путей. Поэтому распределение и твердости и остаточных напряжений в головке рельса представляется весьма значимым. На глубине 10 мм от поверхности качения максимальные средние значения твердости \overline{HB} наблюдаются в зоне вертикальной оси Y (рис. 1). Минимальные значения \overline{HB} регистрируются у боковых поверхностей рельса (рис. 3,а,б). На глубине 22 мм характер распределения твердости иной. У боковых поверхностей отмечается максимальное ее значение, в центральной части сечения вблизи вертикальной оси профиля – минимальное (рис. 3,в,г). Необходимо отметить, что в области боковых поверхностей рельса на глубине 10 и 22 мм значения твердости весьма близки.

Для проведения дальнейшего анализа сечение головки рельса разбивали на три характерные зоны: центральную и две боковые (левую и правую). В каждой из них провели одинаковое количество измерений (не менее 15) в окрестности линий 1 и 2 в направлении оси X на расстоянии 10 и 22 мм от поверхности качения (рис. 1). Как видно из представленных в таблице данных, расхождение между значениями твердости \overline{HB} для обоих рельсов на линии 1 в указанных зонах составляет менее 6%. На глубине 22 мм (на рис. 1 линия 2) уровень \overline{HB} в боковых частях по сравнению с зоной осевой линии выше на 19 и 18% для нового рельса и на 26 и 23% для рельса после наработки.

Поскольку поле средних значений твердости дает лишь общее представление о состоянии материала, для его оценки рекомендуется [5, 6, 12, 13] использовать характеристики рассеяния для массива случайных величин, вычисленных по формулам теории математической статистики. Эти характеристики показывают, насколько велико рассеяние величин, составляющих массив данных, по отношению к среднему значению данной выборки. Значения средне-

Параметры рассеяния характеристик твердости в головке рельса

Состояние рельса	L, мм	\overline{HB}			Характеристика рассеяния значений		
		Левая зона	Центр	Правая зона	Левая зона	Центр	Правая зона
До укладки в путь	10	386	410	409	$\frac{18,59}{0,048}$	$\frac{9,04}{0,022}$	$\frac{14,21}{0,035}$
	22	328	274	325	$\frac{38,41}{0,117}$	$\frac{5,23}{0,019}$	$\frac{30,48}{0,094}$
После наработки	10	367	382	369	$\frac{11,45}{0,031}$	$\frac{7,78}{0,020}$	$\frac{9,33}{0,025}$
	22	334	264	324	$\frac{11,17}{0,051}$	$\frac{10,46}{0,040}$	$\frac{27,79}{0,086}$

Примечание. Над чертой приведены значения среднеквадратического отклонения S_x , под чертой – коэффициента вариации ν_x ; L – расстояние от поверхности качения головки, на котором проводилось измерение.

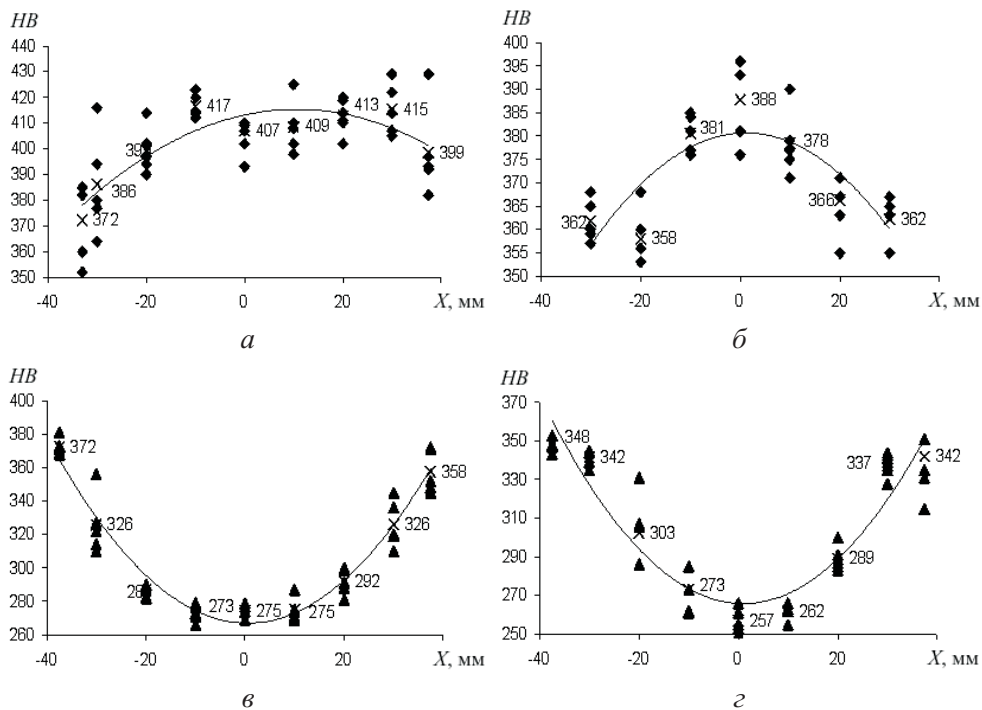


Рис. 3. Значения твердости на расстоянии 10 и 22 мм от поверхности качения для нового рельса (а, в) и рельса после наработки (б, г) (крестиком отмечены средние значения).

квадратического отклонения S_x и коэффициента вариации ν_x рассчитывали соответственно по формулам [14]

$$S_x = k \sqrt{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]}; \quad (2)$$

$$\nu_x = \frac{S_x}{\bar{x}}, \quad (3)$$

где k – поправочный коэффициент, зависящий от объема выборки n ; x_i – значение твердости для i -го измерения; \bar{x} – среднее значение твердости в выборке.

Из данных таблицы следует, что увеличению среднеквадратического отклонения при переходе к боковым зонам сечения соответствует такой же рост коэффициента ν_x . В левой и правой зоне сечения нового рельса на линии 1 (рис. 1) уровень характеристик S_x и ν_x в 2,0 и 1,5 раза выше, чем в центральной зоне, в то время как на расстоянии 22 мм – в 2,0 и 2,5 раза выше, чем аналогичные значения на расстоянии 10 мм. В центральной части значение S_x уменьшилось 1,7 раза, а ν_x практически не изменилось. После эксплуатации рельса характеристики рассеяния и их значения уменьшаются и становятся близкими к определенным по ширине сечения, за исключением центральной и правой боковой зоны на расстоянии 22 мм от поверхности качения. Анализ значений твердости и их рассеяния по сечению, а также уровней остаточных напряжений в сечении рельса при эксплуатации [8] показывает, что в наиболее нагруженной части головки рельса наблюдается существенное рассеяние значений твердости, которое может указывать на деградацию свойств материала и увеличение вероятности возникновения дефектов [12].

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние верхних слоев металла головки и распределение твердости на поверхности качения.

При взаимодействии новых колес с новыми рельсами на поверхности качения возникают значительные контактные давления, а в подповерхностных слоях металла колеса и рельса – циклические объемные напряжения растяжения–сжатия [15]. Для расчета контактных давлений на поверхности качения и объемного напряженного состояния в зоне взаимодействия была построена конечноэлементная модель (рис. 4,а). При ее построении размеры рельса выбирали в соответствии с [11] и колеса с [16], при этом предполагали, что у обоих тел профиль имеет исходный вид, одноточечное взаимодействие происходит в точке контакта колеса и вертикальной оси поперечного сечения рельса. Расчет проводили в условиях статического нагружения осевой силой. Нагрузку на колесо прикладывали по внутренней поверхности отверстия ступицы.

Из результатов расчета следует: при вертикальной нагрузке 100 кН, что соответствует уровню действующей статической осевой нагрузки 20 тс (200 кН), максимальные значения интенсивности напряжений в сечении симметрии системы колесо–рельс равны 137 МПа (рис. 4,б). Составляющая компонента напряжений σ_y в направлении оси Y достигает 247 МПа (рис. 4,в). Для нового профиля колеса диаметром качения 957 мм и рельса, абсолютно жестко закрепленного за низ подошвы, форма площадки контакта близка к кругу диаметром, равным примерно 8 мм (рис. 4,г). При прогибе рельса между шпалами, увеличении осевой нагрузки на колесо, а также при приработке поверхностей взаимодействия форма площадки контакта изменяется. Она вытягивается в направлении продольной оси рельса и приобретает форму эллипса.

Полученные по данным статического расчета значения напряжений должны значительно увеличиваться при движении. Действие контактных напряжений в сумме с тяговыми или тормозными усилиями (для электровоза ВЛ85 при разгоне продольные горизонтальные усилия в зоне контакта колес локомотива с рельсом составляют 74 тс (726 кН), для режима рекуперации при скорости 50 км/ч – 36 тс (358 кН), при 80 км/ч – 23 тс (226 кН)) вызывает локализованное пластическое течение верхних слоев металла. В результате происходит перенаклеп, уменьшаются значения характеристик пластичности, повышается твердость и образуется множество поверхностных трещин, развитие которых приводит к расслоению и выкрашиванию металла головки (дефекты 10, 11 и т. д.) [17]. Данное положение подтверждается измерениями твердости на поверхности нового рельса и после наработки (рис. 5).

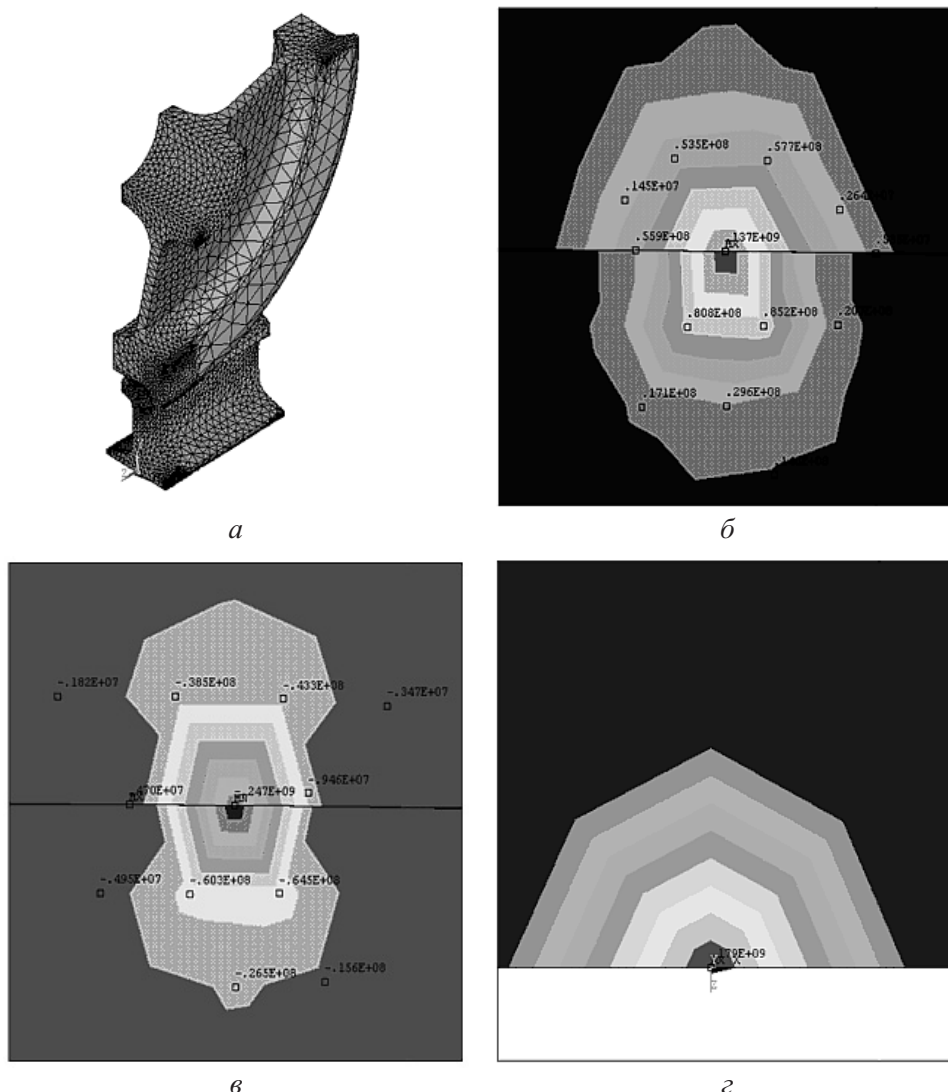


Рис. 4. Распределение напряжений (Па) в контактной паре колесо–рельс: а – конечноэлементная модель; б – уровень интенсивности напряжений; в – уровень напряжений в направлении, перпендикулярном к площадке контакта σ_y ; г – вид площадки контакта.

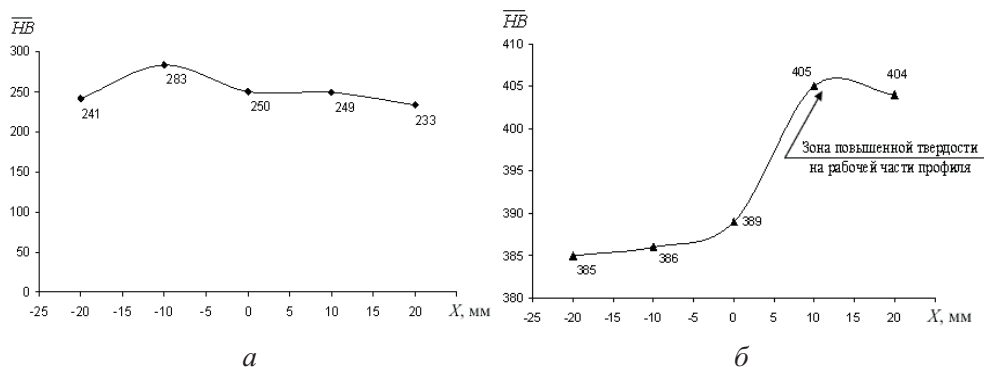


Рис. 5. Средние значения твердости на поверхности качения нового рельса (а) и рельса после эксплуатации (б).

Так, для нового рельса среднее значение твердости \overline{HB} на поверхности качения по ширине головки не превышает 290 HB, изменяясь в интервале 233...283 HB (рис. 5,а). Разность между средними значениями по длине рельса составляет менее 30 HB. Длительная работа рельса на прямом участке пути приводит к повышению средних значений твердости в 1,5 раза, при этом разность между значениями по ширине головки уменьшилась до 20 HB, по длине рельса – до 15 HB. На поверхности качения рельса с наработкой обнаружена зона с повышенной твердостью. Эта зона распространяется от вертикальной оси симметрии поперечного сечения рельса (рис. 5,б) к его боковой рабочей части и является результатом контактного взаимодействия пары колесо–рельс.

Выводы

1. Получены новые данные о распределении значений твердости и их рассеяния в поперечном сечении рельса и на поверхности качения его головки, что позволяет оценить влияние длительной наработки на свойства рельсовой стали.
2. Обнаружена тенденция изменения указанных характеристик на поверхности качения со временем и установлено, что характеристики рассеяния значений твердости являются более информативными.

Резюме

Проведено оцінку механічного стану матеріалу нових рейок і рейок після довготривалої експлуатації на основі отриманих даних про розподіл твердості в поперечному перерізі рейки та розсіяння її характеристик.

1. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов. – М.: Металлургия, 1977. – 430 с.
2. Кращенко В. П., Оксаметная О. Б. О связи между характеристиками прочности и твердости металлов / Под ред. В. П. Кращенко. – Киев: ИПП АН УССР, 1989. – 46 с.

3. *Иванько А. А.* Твердость. Справочник / Под ред. Г. В. Самсонова. – Киев: Наук. думка, 1968. – 128 с.
4. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л.* Новый метод оценки деградации материала в процессе наработки // *Залізничний транспорт України.* – 2003. – № 5. – С. 30 – 33.
5. *Махутов Н. А., Сосновский Л. А., Кебигов А. А.* Метод оценки механического состояния материала рельсов после длительной эксплуатации // *Завод. лаб.* – 2007. – 73, № 8. – С. 49 – 54.
6. *Сосновский Л. А., Махутов Н. А., Кебигов А. А.* Рассеяние механических свойств рельсовой стали // *Там же.* – № 11. – С. 59 – 62.
7. *Вериго М. Ф., Коган А. Я.* Взаимодействие пути и подвижного состава // Под ред. М. Ф. Вериго. – М.: Транспорт, 1986. – 560 с.
8. *Ахмедзянов М. Х.* О механизме развития контактно-усталостных повреждений в рельсах // *Вест. ВНИИЖТ.* – 2003. – № 2. – С. 51 – 53.
9. *Конюхов А. Д.* Остаточные напряжения в железнодорожных рельсах // *Остаточные напряжения и прочность железнодорожных рельсов: Тр. ЦНИИ МПС.* – 1973. – Вып. 491. – С. 10 – 27.
10. *Шаханянц Г. М., Никонов А. М.* Остаточные напряжения в закаленных рельсах Р65 // *Остаточные напряжения и прочность железнодорожных рельсов: Тр. ЦНИИ МПС.* – 1973. – Вып. 491. – С. 27 – 29.
11. *ГОСТ 18267-82.* Рельсы железнодорожные типов Р50, Р65 и Р75 широкой колеи, термообработанные путем объемной закалки в масле. Технические условия. – Введ. 01.01.84.
12. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л., Недосека С. А.* Контроль текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и реализации // *Пробл. прочности.* – 2003. – № 2. – С. 29 – 36.
13. *Патент 52107А, МКИ 7, G 01 N3/00, G 01 N3/40.* Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. “LM-метод твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Опубл. 16.12.02. Бюл. № 12.
14. *Сопротивление* материалов деформированию и разрушению / Под ред. В. Т. Трощенко. – Киев: Наук. думка, 1994. – Ч. 2. – 700 с.
15. *Захаров С. М.* Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения в области колес, рельсов и их взаимодействия // *Железные дороги мира.* – 2002. – № 8. – С. 7 – 10.
16. *ГОСТ 9036-88.* Колеса цельнокатаные. Конструкция и размеры. – Введ. 01.01.90.
17. *НТД/ЦП-1-93.* Классификация дефектов рельсов. *НТД/ЦП-2-93.* Каталог дефектов рельсов. *НТД/ЦП-3-93.* Признаки дефектных и остродефектных рельсов. Нормативно-техническая документация. – М.: Транспорт, 1993. – 56 с.

Поступила 21. 01. 2009