

УДК 620.178.746.22, 620.171.32, 539.533

О. Ясній¹, канд. техн. наук; Т. Вухерер², Ph.D.; Ю. Пиндус¹, канд. техн. наук; А. Сорочак¹; Р. Біщак¹, канд. техн. наук

¹ Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна)

² Маріборський університет (Словенія)

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ МАТЕРІАЛУ ОСІ КОЛІСНОЇ ПАРИ ЛОКОМОТИВА ПІСЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Резюме. Досліджено вплив температури та радіуса вирізки зразків на ударну в'язкість матеріалу осі колісної пари локомотива та оцінено пошкодженість матеріалу осі після експлуатації. Встановлено, що зі збільшенням радіуса вирізки зразка з осі колісної пари ударна в'язкість лінійно зменшується. Зменшення температури випробувань з +20°C до -40°C призводить до зменшення ударної в'язкості в 3 рази.

Ключові слова: вісь, колісна пара локомотива, ударна в'язкість, пошкодженість.

O. Yasniy, T. Vuherer, Yu. Pyndus, A. Sorochak, R. Bishchak

INVESTIGATION OF MATERIAL DEGRADATION OF RAILWAY AXLE AFTER SERVICE

The summary. The damageability and influence of temperature and specimens undercut place on impact toughness of railway axle material after exploitation is investigated. The received experimental data show inversely proportional dependence of impact toughness on the undercut radius of specimens. The decrease of test temperature from +20 to -40°C decreases the impact toughness in 3 times.

Key words: railway axle, impact toughness, damageability.

Вступ. Осі колісних пар локомотивів (КПЛ) розраховують на нескінченний термін експлуатації. Проте відомі випадки їх руйнування, викликані дефектами, що з'являються під час експлуатації і є джерелом зародження та розвитку втомних тріщин [1–5]. Тому існує потреба розроблення надійних методів оцінювання пошкодженості осей в процесі експлуатації та прогнозування їх залишкового ресурсу.

Під час експлуатації вісь колісної пари локомотива піддається статичному і циклічному навантаженню, корозійній дії середовища та впливу кліматичних температур. Схильність до крихкого руйнування матеріалу можна охарактеризувати ударною в'язкістю. В роботі досліджено вплив температури та радіуса вирізки зразків на ударну в'язкість матеріалу осі колісної пари локомотива та оцінено пошкодженості матеріалу осі після експлуатації.

Осі колісних пар залізничного транспорту виготовляють із заготовок з середньо-вуглецевої сталі марки ОСЛ [6], отриманої мартенівським, киснево-конверторним чи електродуговим способом. Хімічний склад сталі відповідає нормам, наведеним у таблиці 1. Основні характеристики механічних властивостей, визначені експериментально на стандартних циліндричних зразках за одновісного розтягу згідно з вимогами [7], наведено в таблиці 2.

Таблиця 1. Хімічний склад сталі ОСЛ (масова доля хімічних елементів, %)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
Не більше							

0,42- 0,45	0,60- 0,90	0,15- 0,35	0,040	0,040	0,30	0,30	0,25
---------------	---------------	---------------	-------	-------	------	------	------

Таблиця 2. Основні характеристики механічних властивостей сталі ОСЛ

Межа міцності, σ_b , МПа	Умовна межа текучості, $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне видовження, δ , %	Відносне звуження, ψ , %
730	382	13,5	40

Оцінювання пошкодженості матеріалу осі колісної пари локомотива після експлуатації. Для оцінювання пошкодженості матеріалу часто використовують густину об'ємних чи поверхневих дефектів, проте її визначення пов'язано з необхідністю дослідження мікродифракції з допомогою електронного мікроскопа та трудомістким процесом підготовки зразків. У роботах А.А. Лебедева та співавторів [8, 9] запропоновано метод оцінювання стану структури матеріалу на основі розкиду його механічних характеристик, зокрема твердості та мікротвердості.

Суть даного методу полягає в застосуванні до розкиду характеристик матеріалу методів математичної статистики, а саме, використанні розподілу Вейбула

$$P(x) = 1 - e^{-(x/k)^m}, \quad (1)$$

де m, k – параметри розподілу.

Параметр m – коефіцієнт гомогенності, який відображає ступінь розкиду характеристик і може бути визначений за формулою Гумбеля, котра для випробувань на мікротвердість має вигляд [9]

$$m = \frac{d(n)}{2,30259 S(\lg H_\mu)}. \quad (2)$$

Величину $d(n)$ визначають залежно від кількості вимірювань n , а величину $S(\lg H_\mu)$ – за результатами n вимірювань мікротвердості

$$S(\lg H_\mu) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_{\mu i} - \overline{\lg H_\mu})^2}, \quad (3)$$

де $\overline{\lg H_\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg H_{\mu i}$ – середнє значення логарифмів мікротвердості.

Таким чином, більшим значенням коефіцієнта m відповідає нижчий рівень розкиду характеристик мікротвердості і, відповідно, нижчий рівень пошкодженості, а меншим значенням навпаки – вищий рівень пошкодженості.

В даній роботі з використанням цієї методики проведено дослідження пошкодженості матеріалу – сталі ОСЛ, – знятої з експлуатації осі КПЛ залежно від відстані h до поверхні осі. Дослідження проводили на відполірованих зразках, вирізаних в осьовому напрямку з двох ділянок осі КПЛ (рис. 1). Ділянка 1 призначена для посадки з натягом підшипника букси колісної пари, ділянка 2 – галтель, що прилягає до місця посадки підшипника. За допомогою методу скінченних елементів було показано, що ділянка 2 є найнебезпечнішим перерізом з точки зору зародження та поширення втомних тріщин в осі КПЛ [10].

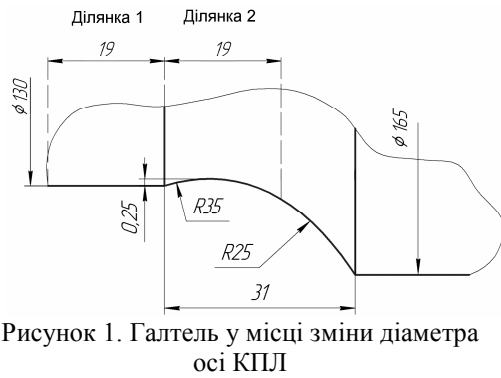


Рисунок 1. Галтель у місці зміни діаметра осі КПЛ

Мікротвердість визначали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 з алмазною пірамідкою з кутом при вершині 136° при навантаженні на індентор 100 г з витримкою 15 с за стандартною методикою [11]. Мікротвердість вимірювали в 20 точках на відстані до поверхні осі $h = 1 \div 20$ мм, при цьому $d(20) = 1,05$ [8]. Середні значення мікротвердості залежно від відстані до поверхні осі наведено на рис. 2а, їх розкид зображений

вертикальними відрізками. На основі отриманих результатів із використанням рівнянь (2), (3) обчислювали коефіцієнт гомогенності m (рис. 2б).

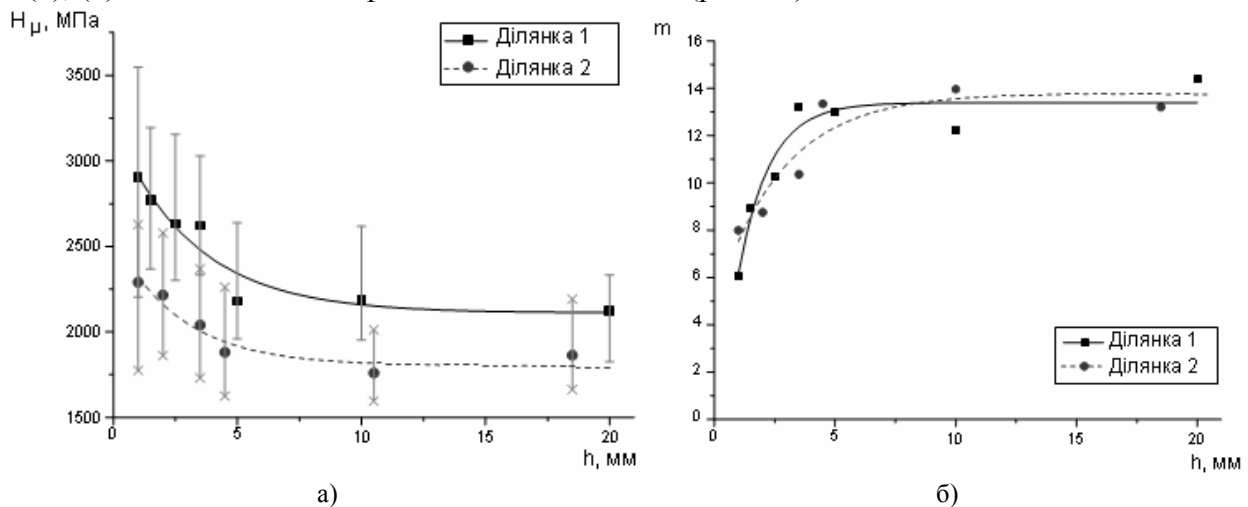


Рисунок 2. Результати вимірювання мікротвердості, її розкид (а) та коефіцієнт гомогенності (б) залежно від відстані до поверхні осі КПЛ

На обох ділянках мікротвердість на відстані $h = 1$ мм до поверхні в 1,25 раза більша за мікротвердість внутрішніх шарів матеріалу, при цьому біля зовнішньої поверхні осі КПЛ розкид мікротвердості значно більший (рис. 2а). На ділянці 1 це пояснюється залишковими напруженнями від пластичного деформування обкаткою роликком у процесі виготовлення осі КПЛ. Незалежно від відстані до поверхні осі мікротвердість на ділянці 2 в 1,2 раза менша, ніж на ділянці 1.

Для ділянок 1 і 2 коефіцієнт гомогенності m на відстані $h = 1$ мм до поверхні осі в 2,2 і 1,7 раза менший, відповідно, ніж у внутрішніх шарах матеріалу, що вказує на більшу пошкодженість матеріалу біля зовнішньої поверхні осі (рис. 2б). Це пояснюється накопиченням втомних пошкоджень у процесі експлуатації осі КПЛ.

Вплив температури на ударну в'язкість матеріалу осі колісної пари локомотива. Досліджували матеріал осі колісної пари локомотива – сталь ОСЛ – після 20 років експлуатації. Оскільки в процесі роботи осі колісної пари втомні тріщини зароджуються на її поверхні та ростуть у радіальному напрямку, вирізанні зразків проводили в осьовому напрямку. Зразки для визначення ударної в'язкості вирізували з ділянки осі діаметром 198 мм на різній відстані від її центру. Схема вирізування зразків наведена на рисунку 3.



Рисунок 3. Схема вирізування зразків

Ударну в'язкість визначали навантаженням зразків типу Шарпі розмірами 10x10x55 мм із V-подібним надрізом радіусом $0,25 \pm 0,025$ мм на копрі РКР-300 з енергією удару 300 кДж із реєстрацією діаграми навантаження в координатах „зусилля – час” та „зусилля – прогин зразка”. Проводили дві серії випробувань при температурі $+20^{\circ}\text{C}$ та -40°C . На основі даних діаграм визначали зусилля, при якому починалася пластична деформація, повну енергію руйнування, енергію зародження та енергію поширення тріщини. За результатами фактографічних досліджень зламу зразка визначали частку в'язкого руйнування.

Ударну в'язкість визначали за формулою

$$KCV = A / F, \quad (4)$$

де A – повна робота руйнування зразка; F – площа поперечного перерізу зразка в місці надрізу.

Програма керування випробувальною установкою РКР-300 та записування інформації випробувань «VUNI-CHARPY» дозволяє визначати складові енергії руйнування зразка з допомогою перетворення залежності “зусилля-час” ($P-t$) у залежність “зусилля-переміщення” ($P-s$). Для цього за відомою масою ударника m , початковою швидкістю удару v_0 та залежністю $P(t)$ з допомогою подвійного послідовного інтегрування обчислювали зміну швидкості ударника $v(t)$ при навантаженні зразка Шарпі згідно з рекомендаціями [12, 13]:

$$v(t) = v_0 - \frac{1}{m} \int_{t_0}^t P(t) dt, \quad (5)$$

після чого залежність переміщення ударника s від часу t

$$s(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt . \quad (6)$$

За отриманими залежностями визначали $P(s)$ та складові енергетичних витрат на руйнування зразка на окремих етапах.

Діаграми ударного руйнування зразків у координатах „витрати енергії на руйнування – час” наведено на рисунку 4. Результати експериментального визначення ударної в'язкості KCV для кожного із досліджених зразків, повну енергію руйнування E , енергію зародження E_z та енергію поширення тріщини E_n представлено в таблиці 3.

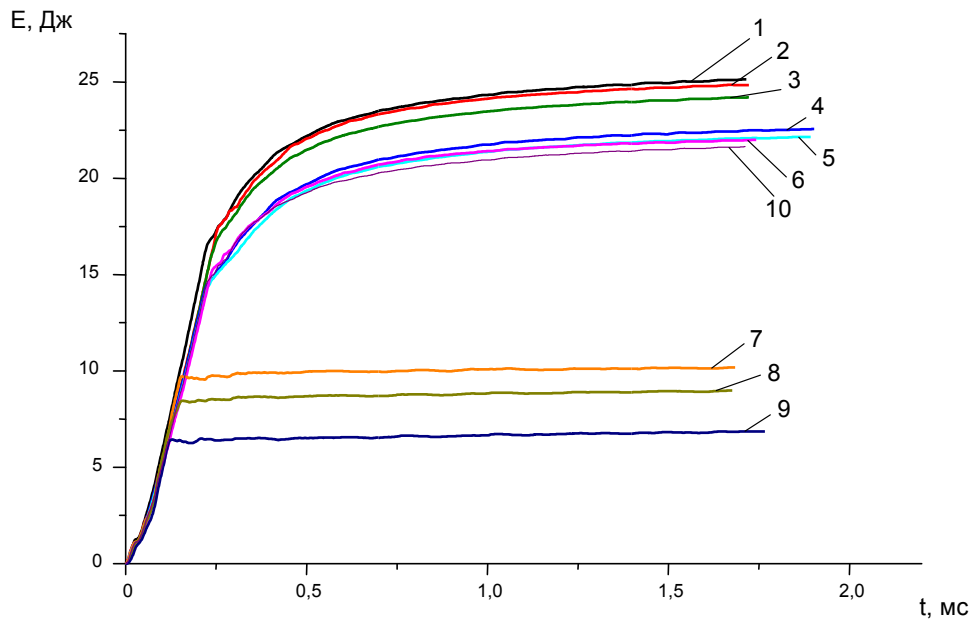


Рисунок 4. Діаграми ударного руйнування зразків у координатах „витрати енергії на руйнування – час” при температурі $+20^{\circ}\text{C}$ (1-6, 10) та -40°C (7-9)

Отримані результати показують обернено пропорційну залежність ударної в'язкості сталі від радіуса вирізки зразків з осі колісної пари локомотива (рис. 5). Зокрема зі збільшенням радіуса вирізування з 12 мм до 94 мм ударна в'язкість при температурі $+20^{\circ}\text{C}$ зменшується на 15,6%, а при зміні радіуса вирізування з 66 до 94 мм при -40°C – на 32,5%. Причини цього явища можуть полягати в технології виготовлення осей колісних пар залізничного транспорту, при якій вісь підлягає зміцнювальному накочуванню роликом по всій довжині для підвищення опору багатоцикловій втомі [14].

Зменшення температури випробування зразків з $+20$ до -40°C призводить до різкого зменшення ударної в'язкості та частки в'язкого руйнування. Для приповерхневих шарів осі ударна в'язкість зменшується більше, ніж у 3 рази.

Таблиця 3. Результати експериментального визначення ударної в'язкості

№ зразка	Радіус вирізки, мм	Температура випробувань, $^{\circ}\text{C}$	E_z , Дж	E_n , Дж	E , Дж	Частка в'язкого руйнування, %	KCV , Дж/см ²
1	12	+20	15,82	9,32	25,14	28,1	31,97

2	26	+20	16,27	8,58	24,85	33,1	31,06
3	52	+20	15,04	9,16	24,20	31,9	30,25
4	66	+20	13,59	8,98	22,57	33,0	28,21
5	80	+20	13,64	8,50	22,14	21,1	27,68
6	94	+20	13,40	8,60	22,00	26,6	27,50
7	66	-40	8,12	2,06	10,18	4,1	12,72
8	80	-40	5,16	3,82	8,98	3,3	11,23
9	94	-40	4,21	2,65	6,86	5,1	8,58
10	94	+20	13,60	8,05	21,65	33,3	27,06

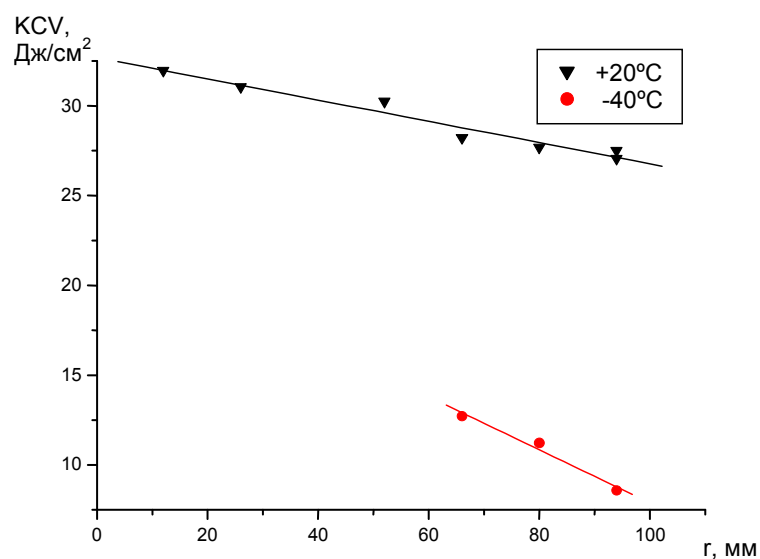


Рисунок 5. Залежність ударної в'язкості від радіуса вирізки зразка

Фрактографічні дослідження поверхні руйнування зразків проводили на скануючому електронному мікроскопі Selmi РЭМ-106И у режимі вторинних електронів.

Поверхня руйнування сталі ОСЛ за температури +20°C (рис. 6а) представлена послідовними ділянками ямкового в'язкого внутрізеренного руйнування (рис. 6б) та ділянками квазісколу (рис. 6в). Механізм руйнування сталі внутрішньозеренний. Злам характеризується незначною пластичною деформацією з утворенням сітки гребенів. Це свідчить про наявність крихкого та окремих в'язких мікромеханізмів руйнування [15]. При зниженні температури випробувань до -40°C частка в'язкого руйнування скорочується до 3–5%.

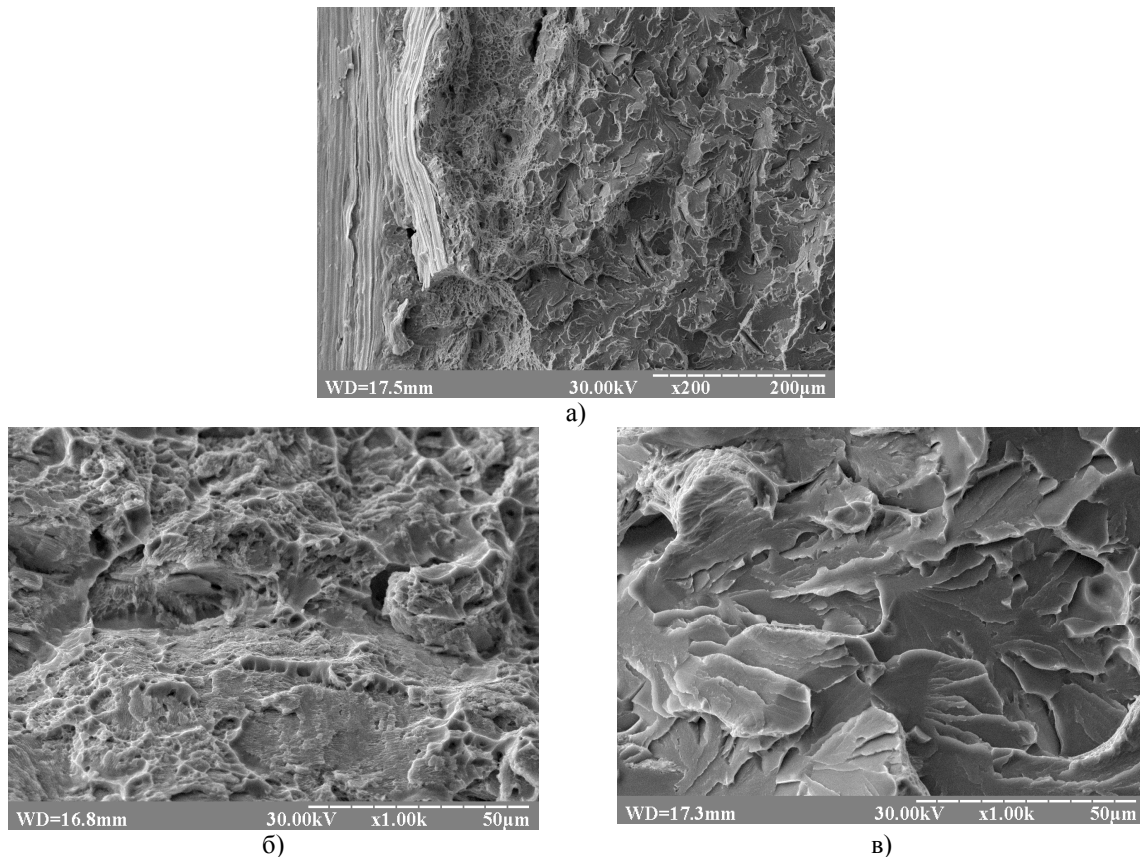


Рисунок 6. Поверхня зламу (а) та ділянки в'язкого руйнування (б) та квазісколу (в) поверхні руйнування зразка Шарпі

Висновки. За допомогою методу оцінювання стану структури матеріалу на основі розкиду його мікротвердості виявлено, що для найнебезпечнішого перерізу осі КПЛ коефіцієнт гомогенності m на відстані $h = 1$ мм до поверхні осі в 2,2 раза менший, ніж у внутрішніх шарах матеріалу. Це вказує на більшу пошкодженість матеріалу біля зовнішньої поверхні осі, що пояснюється накопиченням втомних пошкоджень у процесі експлуатації осі КПЛ.

Досліджено вплив температури і місця вирізування зразків на ударну в'язкість матеріалу осей колісних пар локомотивів. Встановлено, що зі збільшення радіуса вирізування зразка з осі колісної пари ударна в'язкість лінійно зменшується. Зменшення температури випробувань з $+20^{\circ}\text{C}$ до -40°C призводить до зменшення ударної в'язкості в 3 рази.

Фрактографічними дослідженнями зламів зразків за допомогою електронного мікроскопа виявлено ділянки в'язкого (ямкового) руйнування та ділянки квазісколу, причому при зниженні температури випробувань до -40°C частка в'язкого руйнування значно скорочується.

Література

1. Zerst, U. Fracture mechanics in railway applications – an overview / U. Zerst, K. Maedler, H. Hintze // *Fract. Mech.* – 2005. – Vol. 72. – P. 163–194.
2. Smith, R.A. A brief historical overview of the fatigue of railway axles / R.A. Smith, S. Hillniansen // *Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: Journal of Rail and Rapid Transit.* – 2004. – № 218. – P. 267–277.
3. Gerdun, V. Failures of bearings and axles in railway freight wagons / V. Gerdun, T. Sedmak, V. Sinkovec, I. Kovse, B. Cene // *Eng. Failure Analysis.* – 2007. – Vol. 14. – P. 884–894.
4. Hirakawa, R. The analysis and prevention of failure in railway axles / R. Hirakawa, K. Toyama, M. Kubota // *Int. J. Fatigue.* – 1998. – Vol. 20. – P. 135–144.
5. Gravier, N. Predicting the life of railway vehicle axles / N. Gravier, J-J. Viet, A. Leluan // *Proceedings of the 12th International Wheelset Congress.* – Quigdao, China, 1998. – P. 133–146.

6. ГОСТ 4728-96. Заготовки осевые для подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. – Введ. 1998-01-01. – М: Из-во стандартов, 1997. – 6с.
7. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 1986-01-01. – М: Из-во стандартов, 1985. – 28с.
8. Лебедев, А.А. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости [Текст] / А.А. Лебедев, Н.Р. Музыка, Н.Л. Волчек // Проблемы прочности. – 2002. – № 4. – С. 5–11.
9. Лебедев, А.А. Контроль текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и результаты [Текст] / А.А. Лебедев, Н.Р. Музыка, Н.Л. Волчек, С.А. Недосека // Проблемы прочности. – 2003. – № 2. – С. 29–36.
10. Пиндус, Ю. Оцінка коефіцієнтів інтенсивності напружень на фронті півеліптичної тріщини осі колісної пари електропотяга [Текст] / Ю. Пиндус, Г. Сулим, О. Ясній // машинознавство. – 2008. – Т. 133, №7. – С. 9-13.
11. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников [Текст]. – Введ. 1977-01-01. – М.: Из-во стандартов, 1976. – 33с.
12. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах [Текст]. – Введ. 1979-01-01. – М: Из-во стандартов, 1989. – 11с.
13. Влияние температуры и скорости нагружения на энергию зарождения и распространения трещин в образцах Шарпи из углеродистых сталей [Текст] / В.В. Харченко, Е.А. Кондряков, В.Н. Жмака [и др.] // Проблемы прочности. – 2006. – №5. – С. 120–127.
14. ГОСТ 31334-2007. Оси для подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия [Текст]. – Введ. 2008-07-01. – М.: Стандартиформ, 2008. – 23с.
15. Strnadel, V. Statistical scatter in fracture toughness and Charpy impact energy of pearlitic steel / V. Strnadel, P. Haušild // Material science and engineering. – 2008. – Vol. 486, № 1–2. – P. 208–214.