



ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТА ОДИНИЦІ РУХОМОГО СКЛАДУ

А. Швець, провідний інженер кафедри «Теоретична та будівельна механіка»

А. Швець, магістр

В. Касянчук, студент

Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна

У статті представлені деякі результати досліджень міцнісних якостей елемента одиниці рухомого складу, пошук засобів проектування, моделювання, підбору, обґрунтування продовження терміну служби вантажного вагону на прикладі хребтової балки.

У відповідності до Комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки, Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 р., Державної програми «Український вагон» одним з пріоритетних напрямків розвитку залізничної галузі є оновлення вантажного вагонного парку Укрзалізниці конкурентоспроможними моделями вагонів вітчизняного виробництва шляхом удосконалення базових конструкцій [Недужа, Л. О. Теоретичні та експериментальні дослідження міцнісних якостей хребтової балки вантажного вагона (1); Недужа, Л. О. Використання сучасного пакету програм при розв'язанні інженерних задач на залізничному транспорті (2)].

В умовах світових економічних процесів ефективна державна транспортна політика України повинна враховувати геополітичні аспекти, особливості галузі, її роль в процесах економічних й соціальних перетворень для розвитку галузі, забезпечення її конкурентоспроможності. Оскільки транспорт — одна із важливих галузей національної економіки, ефективною його роботою є необхідна умова стабілізації, структурних

перетворень, розвитку зовнішньоекономічної діяльності, захисту економічних інтересів України. Це ланка господарства, яка формує інфраструктуру та забезпечує взаємозв'язок всіх її елементів, забезпечує функціонування світового господарства і потреб населення в усіх видах перевезень [Мямлін, С. В. Технічний стан ковзунів як один із факторів впливу на динаміку вантажних вагонів; Визначення впливу показників тертя в системі «кузов-візок» на динаміку вантажного вагона; Дослідження динаміки та міцності вантажних вагонів (3-5)].

Технічний рівень рухомого складу залізничного транспорту безпосередньо впливає на економічні показники транспортної галузі та економіки країни в цілому. Тому посилення потужностей залізничної галузі України є стратегічним напрямком розвитку її економіки. Ключову роль у підвищенні конкурентоспроможності та ефективності залізничного транспорту відіграє рівень техніко-економічних показників рухомого складу, найбільша частка якого припадає на вантажні вагони. Пріоритетним напрямком поліпшення техніко-економічних показників

вантажних вагонів є удосконалення їх конструкцій, що доцільно робити за рахунок створення інноваційних конструкцій або модернізації їх окремих складових. При цьому удосконалення складових передбачає використання у якості їх елементів нових профілів, які характеризуються меншими матеріалоемністю та собівартістю виготовлення при забезпеченні необхідних умов міцності.

В зв'язку з насиченістю ринку вантажним рухомих складом попитом на ринку залізничних перевезень користуються ті вантажні вагони, які мають поліпшені технічні характеристики, що забезпечують виконання однієї із головних вимог – надійності. Її підвищення дозволяє значно зменшити кількість позапланових відчіпних ремонтів і, отже, збільшує економічну ефективність вантажного рухомого складу, який експлуатується [Тен, А. А. Экспериментальные исследования динамической нагруженности полувагона на перспективных тележках; Калівода, Я. Досвід експериментальних досліджень рухомого складу з використанням стендового обладнання; Kalivoda, J. Enhancing the scientific level of engineering training of railway transport professionals / J. Kalivoda, L. O. Neduzha (6-8)].

Підвищення якості створюваного механічного устаткування й конструкцій необхідно пов'язувати, насамперед, із зменшенням їх ваги і вартості, збільшенням надійності та покращенням ряду інших характеристик. Актуальною є проблема поєднання в процесі проектування двох взаємовиключних тенденцій: економії матеріалу, з одного боку, і забезпечення необхідних характеристик міцності конструкцій, з іншого. Все це можна забезпечити за рахунок використання комп'ютерних технологій.

Як відомо, серед основних напрямків діяльності залізничної галузі є: розвиток швидкісного руху поїздів; підвищення рівня безпеки руху; розробка нового рухомого складу і модернізація існуючого парку. Це підтверджує, що транспортна галузь повинна рухатися в напрямку інноваційних змін, підвищувати своє значення як важливої транзитної підсистеми на шляху оновлення не тільки інфраструктури, а й стратегії всіх складових перевізного процесу, в тому числі й при роботі у взаємозв'язку з іншими видами транспорту [(1), Neduzha, L. O. Application of APM WinMachine software for design and calculations in mechanical engineering / L. O. Neduzha, A. O. Shvets (9)].

Міцність та ресурс основних несучих елементів рухомого складу залізниць є фундаментальними властивостями, які визначають їх подальшу успішну експлуатацію протягом тривалого періоду часу. Оцінка цих показників тісно пов'язана із забезпеченням вимог безпеки руху на залізничному транспорті, тому проблема наукового обґрунтування оцінок характеристик динаміки, міцності і ресурсу несучих конструкцій є важливою та актуальною як для нового рухомого складу, так й при проведенні робіт з продовження термінів служби рухомого складу, який виробив гарантований заводом-виробником термін.

Для обґрунтованого вирішення зазначеної проблеми виконуються комплексні фундаментальні експериментальні, теоретичні та організаційні роботи, які можуть включати в себе:

- оцінку поточного технічного стану несучих конструкцій екіпажної частини рухомого складу (при проведенні робіт з оцінки його залишкового ресурсу);
- аналітичний розрахунок характеристик міцності елементів екіпажної частини з використанням докладних моделей методу кінцевих елементів з метою виявлення найбільш навантажених зон несучих конструкцій, а також допустимих рівнів корозійної дії;
- прогноз динамічних якостей екіпажу методами математичного моделювання;
- оцінку ресурсу (повного або залишкового) з максимально можливим використанням даних натурних випробувань;
- оцінку живучості конструкції на підставі теоретичних досліджень та відповідних випробувань.

При виконанні інженерних розрахунків, пов'язаних з аналізом міцності машин, механізмів, конструкцій на практиці застосовують як аналітичні, так і чисельні методи. Використання сучасних комп'ютерних комплексів дозволяє не лише відтворювати дані й відомості тим чи іншим способом, а також надає можливість ефективно та безпосередньо взаємодіяти з інформаційним об'єктом, що створюється або демонструється. Програмні комплекси різного призначення вміло застосовують сучасні комп'ютерні технології на всіх етапах проектування, розробки, експлуатації, для визначення остаточного ресурсу, а саме: попереднього дослідження, вибору принципів дії, розробок ескізного та технічного проектів, їх оптимізації, підготовки конструкторської документації та керуючої інформації для автоматизованих виробництв, всебічного інженерного аналізу тощо [(8), Татарінова, В. А. Застосування програмних комплексів при дослідженні стану транспортних засобів / В. А. Татарінова, Я. Калівода, Л. О. Недужа (10); Комп'ютерне моделювання залізничних транспортних засобів: метод. вказівки до виконання практичних робіт, курсового та дипломного проектування / М. І. Капіца, Я. Калівода, Л. О. Недужа, О. Б. Очкасов, Д. В. Черняєв (11)].

Згідно з Технічним регламентом безпеки рухомого складу залізничного транспорту, який визначає основні вимоги до рухомого складу, що виготовляється та модернізується, а також до його складових і запасних частин під час проектування, виробництва, монтажу, налагодження, введення в експлуатацію, експлуатації, ремонту.

Конструкційні рішення рухомого складу залізничного транспорту повинні забезпечувати його безпеку протягом устанавленого виробником строку експлуатації та/або гарантійного строку використання та/або строку зберігання, витримувати впливи, які мають місце у процесі його експлуатації. Рама вагона

є основою кузова, яка сприймає від нього та вантажу, що перевозиться, все навантаження, передає їх на ходові частини і, крім того, служить для розміщення автогальмового обладнання й автозчепних пристроїв. Рами сучасних вантажних вагонів представляють собою міцні металеві суцільнозварні конструкції з повздовжніх і поперечних балок.

Одним з найбільш відповідальних несучих вузлів є хребтова балка, яка служить для кріплення на ній автозчепного й гальмівного обладнання, за допомогою автозчепного пристрою вона передає повздовжні сили на інші вагони. Оскільки хребтова балка жорстко зв'язана також з іншими елементами кузова, то поряд з повздовжніми вона сприймає й вертикальні сили. Таким чином, хребтова балка повинна мати достатню міцність та жорсткість, бути простою по конструкції, надійною в експлуатації, доступною для технічного огляду [1].

Динамічні ударні випробування вантажних вагонів, при яких поздовжні ударні сили прикладаються до рами вагона через автозчеплення, проводять з метою визначення динамічних напружень та їх розподілу в елементах рами і кузова вагона, граничної допустимої величини поздовжньої сили, при якій може відбутися руйнування рами або кузова вагона.

Метою випробувань на статичну міцність є оцінка показників міцності та несучої здатності конструкції вагона. Оцінка міцності конструкції дослідного зразка вагона при міцнісних статичних випробуваннях

проводиться шляхом порівняння величин сумарних напружень від поєднання розрахункових експлуатаційних навантажень по I, III і ремонтним розрахунковим режимам з величинами допустимих напружень:

I режим — зрушення з місця, осаджування або екстрене гальмування при малих швидкостях руху, зіткнення вагонів при маневрових роботах;

III режим — рух поїзда з найбільшою допустимою швидкістю;

ремонтний режим — піднімання завантаженого і порожнього вагону домкратами, встановленими у відповідних точках.

Для прикладу представлені деякі результати досліджень на міцність хребтової балки різних видів рухомого складу:

— для вагонів-платформ моделей 13-1839 і 13-9990-01, а також критого вагону моделі 11-9962 представлені в табл. 1 та на рис. 1, а (результати

Таблиця 1 — Максимальні еквівалентні напруження в хребтовій балці

Експериментальні напруження, МПа	Моделі вантажних вагонів		
	13-1839	13-9990-01	11-9962
$\sigma_{екв. I розт}$	122	145	106
$\sigma_{екв. I ст}$	96	65	325
$\sigma_{екв. III розт}$	147	175	97
$\sigma_{екв. III ст}$	61	148	135
$\sigma_{екв. ремонт}$	30	132	166

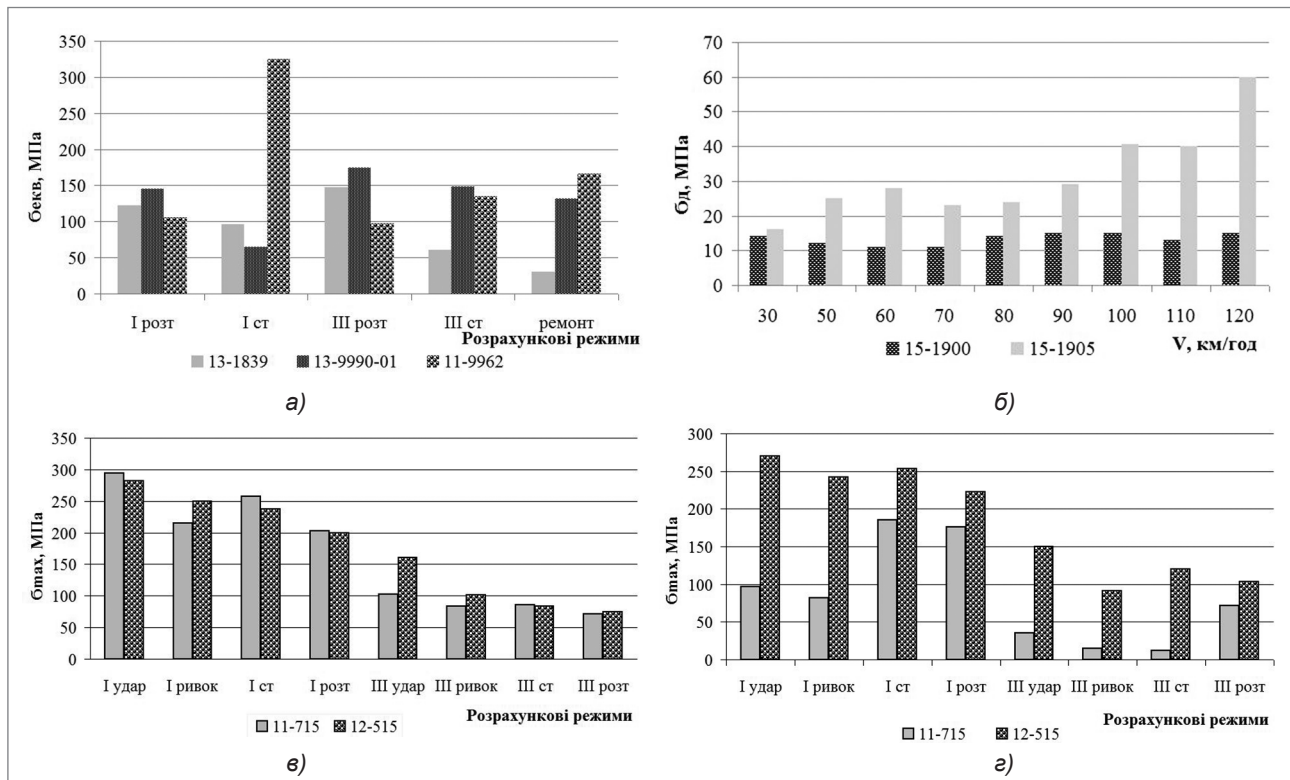


Рисунок 1 — Напруження в хребтовій балці: а) максимальні еквівалентні напруження в хребтовій балці вагонів-платформ моделей 13-1839 і 13-9990-01, а також критого вагону моделі 11-9962; б) динамічні напруження в хребтових балках від швидкості руху вагона-цистерни моделі 15-1900 і піввагона моделі 15-1905; в) динамічні напруження в хребтовій балці вагона-платформи моделі 13-9975 (порожній режим); г) динамічні напруження в хребтовій балці вагона-платформи моделі 13-9975 (завантажений режим)

Таблиця 2 – Максимальні напруження в хребтовій балці

	Моделі вагонів	Максимальні напруження, МПа							
		I режим				III режим			
		удар	ривок	ст	розт	удар	ривок	ст	розт
У середній частині	11-715	152	108	131	115	76	74	82	57
У зоні шкворневої балки	11-715	294	215	257	203	102	84	86	71
	12-515	282	250	237	200	160	101	84	75
В консольній частині	11-715	97	82	185	176	35	15	12	72
	12-515	270	242	253	223	150	91	120	103

Таблиця 3 – Границі витривалості для марок сталей хребтових балок

Марка сталі	Границя міцності, МПа, (не менше)	Границя текучості, МПа, (не менше)	Обмежена границя витривалості при симетричному циклі, МПа (не менше)	
			нормальні σ_{-1No}	дотичні τ_{-1No}
Ст. 3 (20)	380	240	170	110
Ст. 5 (35)	500	280	220	140
ОсВ, ОсЛ	560 – 590	280	220	–
Ст. 6 (45)	600	310	250	160
09Г2 (09Г2Д)	460	310	200	130
09Г2ДТ, 10Г2С1	500	350	230	140
40Х (поліпшена)	1000	800	380	230
45Г2	700	400	320	190
55С2 (поліпшена)	1300	1200	550	330
Лита сталь по ТЗ УВЗ № 61, ТЗ-1 й № 517 ТЗ-1	420	250	170	–
Вуглецева (фасонні виливки):				
20Л	420	220	170	–
35Л	500	280	200	–

Примітка: Границі витривалості відносяться до малих полірованих зразків при круговому згині й $N_0 = 10^7$ циклів

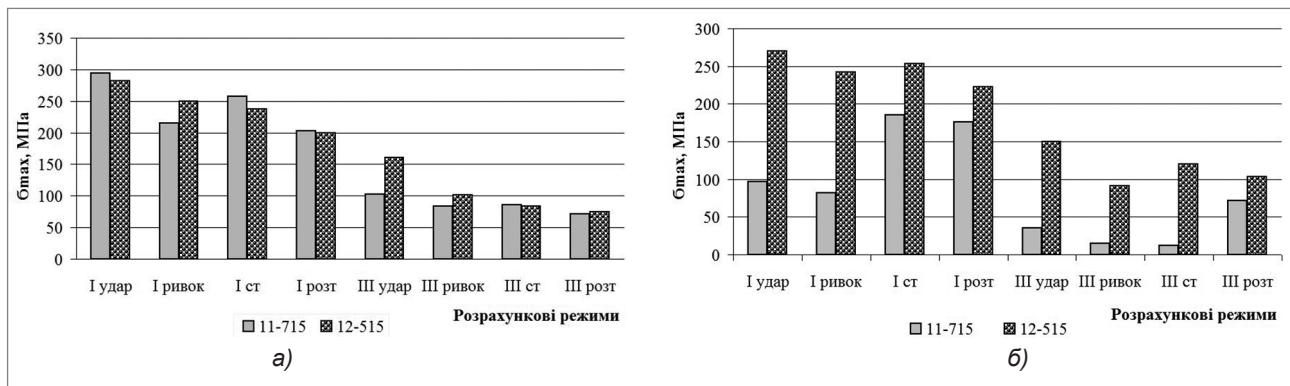


Рисунок 2 – Графіки залежності максимальних напружень в хребтовій балці вагонів моделі 11-715 і 12-515: а) у зоні шкворневої балки; б) в консольній частині

статичних випробувань на міцність вагонів від дії вертикального навантаження, бокової сили, навантаження від різниці висот автозчеплень, бокових сил взаємодії між вагонами в кривих, поздовжніх розтягуючих та стискаючих навантажень при I і III розрахункових режимах) [1].

Наступним етапом відпрацювання конструкції вагона, оцінки його динамічних та міцнісних якостей та введення в експлуатацію є динамічні поїзні (ходові) випробування. За результатами приймальних випробувань встановлюються придатність вагона до експлуатації. Зокрема, встановлюється допустима швидкість руху вагона, при якій забезпечується без-

пека руху, необхідна міцність, стійкість й плавність ходу вагона (в основному для пасажирського вагона) на прямих та в кривих ділянках сучасної типової конструкції верхньої будови колії, що задовольняє встановленим нормам поточного утримання. Реєстрація вимірюваних процесів при ходових випробуваннях проводиться на прямих, кривих ділянках колії та стрілочних переводах у всьому діапазоні допустимих експлуатаційних швидкостей, починаючи зі швидкості 25 км/год. до конструкційної швидкості 120 км/год. в завантаженому режимі вагонів.

На рис. 1-2 представлені графіки залежності динамічних напружень в основних несучих вузлах:



Рисунок 3 – Вагон-платформа моделі 13-7024

- вагона-цистерни моделі 15-1900 та піввагона моделі 12-1905 (рис. 1, б);
- вагона-платформи моделі 13-9975 на різних ділянках залізничної колії (рис. 1, в, г).

З урахуванням проведеного обстеження технічного стану в результаті розрахунків були отримані напруження при I й III розрахункових режимах:

- для вагонів моделі 11-715 та 12-515 (табл. 2 та рис. 2).

Для хребтової балки вагона-платформи моделі 13-7024 (рис. 3) був виконаний розрахунок на міцність. Отримані розрахункові значення напружень не перевищували допустимого значення для основних марок сталі хребтових балок одиниць рухомого складу (табл. 3).

За допомогою розрахунків з використанням сучасного програмного комплексу були побудовані епюри поперечних сил і згинальних моментів, діаграми переміщень та напружено-деформованого стану хребтової балки платформи (рис. 4) [1, 3-5, 10-11].

Рухомий склад, що має значний термін служби, вимагає додаткового контролю для забезпечення безпеки руху. У зв'язку з чим вкрай важливо знати не тільки реальну картину напружено-деформованого стану, на

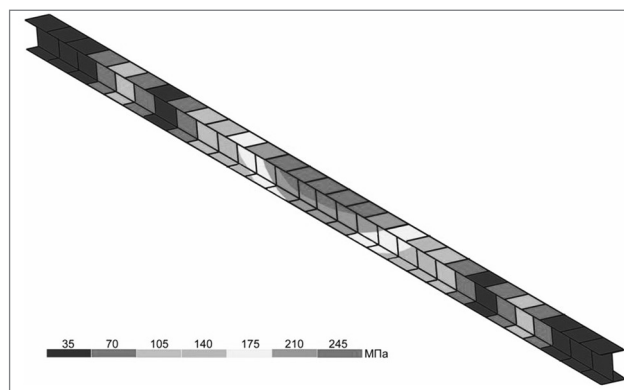


Рисунок 4 – Діаграма напружено-деформованого стану хребтової балки

основі якого виконується оцінка ресурсу, а й фактичні фізико-механічні характеристики металу, тобто як змінилися основні механічні характеристики (границя міцності, твердість, границя витривалості, ударна в'язкість і т. п.) несучої конструкції після тривалої експлуатації [1, 6].

Результати обстеження технічного стану таких вагонів після тривалої експлуатації показують, що більшість експлуатаційних ушкоджень пов'язані з порушеннями в експлуатації при навантаженні і вивантаженні вантажу. Більшою мірою це пошкодження розвантажувально-дозуючих пристроїв, обшиви кузова, бункерів і т. п. У той же час виявлення істотних дефектів несучих конструкцій, таких як тріщини в хребтових та шкворневих балках, неприпустимі їх деформації та інші несправності, що не підлягають ремонту, мають досить малий відсоток.

За результатами виконаних розрахунків, з урахуванням інформації, отриманої при технічному обстеженні вагонів, а також рекомендацій, розробляється схема наклейки тензометричних датчиків для подальшого проведення контрольних випробувань вагонів [3-5]. Відібраний зразок (вагон) з найгіршим технічним станом направляється для проведення контрольних випробувань, що включають режими навантаження, характерні специфіці експлуатації: зіткнення вагонів, скидання з клинів (імітація поїзного режиму), завантаження/розвантаження.

Результати розрахунків і проведених випробувань дають практично повну картину напружено-деформованого стану конструкції вагона. У той же час, з огляду на його тривалу експлуатацію, необхідно знати інформацію про фактичні значення фізико-механічних характеристик матеріалу, з якого виготовлена несуча конструкція, яка визначає залишковий ресурс вагона. Хребтова балка піддається впливу навантаження, яке змінюється циклічно. Причому напруження досягають максимуму в області, прилеглої до границі між вертикальною стійкою профілю та його нижньою полицею. У процесі тривалої експлуатації це може призвести до зародження і акумуляції в даній області дефектів, що знижують механічні характеристики сталі.

Базуючись на отриманих результатах розрахунків і випробувань, встановлюються проблемні зони несучої конструкції, а також з урахуванням деформаційної картини розробляються схеми вирізки зразків металу для дослідження хімічного складу і фізико-механічних властивостей матеріалу несучої конструкції.

Таблиця 4 – Механічні характеристики сталі хребтової балки рами вагона

Номер зразка	σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
По ГОСТ 19281-89 клас міцності 345	Таблиця 1 ГОСТ 19281-89 – Сортовий і фасонний прокат			
	не < 345	не < 480	не < 21	–
Зразки, вирізані з верхньої полиці				
Середнє значення	355	478,85	24,7	74
Зразки, вирізані з вертикальної стійки				
Середнє значення	360	479,4	24,48	73

Деякі результати визначення механічних характеристик сталі 09Г2Д після тривалої експлуатації представлені в табл. 4 [1].

Як зазначено «Технічним регламентом», однією з основних частин технічного забезпечення безпеки руху є виробництво рухомого складу. Сучасним вимогам відповідає лінія для виготовлення хребтових балок вантажних вагонів (рис. 5), що є універсальною, дозволяє повністю автоматизувати цей процес та випускати їх для трьох типів вагонів на одному і тому ж обладнанні [1].



Рисунок 5 – Робототехнічний комплекс для виготовлення хребтової балки для приварювання підсилюючого профілю до хребтової балки

Установка автоматичного зварювання елементів хребтової балки є комплексом технологічного облад-

нання, що забезпечує їх збірку та подальше зварювання між собою в автоматичному режимі із застосуванням електромеханічної системи стеження за зміною положення осі зварного з'єднання. Роботи-зварювальники й роботи-маніпулятори дозволяють домогтися точності роботи та тонкості зварювального шва, що недоступно людині. Розміри зазорів та наявність ексцентриситетів в автотцепленнях вагонів істотно позначаються на величину поздовжніх зусиль в хребтовій балці і можуть викликати додаткові напруження в вузлах, в ряді випадків переважаючи основні напруження в конструкції. Зменшення ексцентриситетів у результаті застосування робототехнічних комплексів знижує додаткові напруження, що дозволяє полегшити конструкцію при незмінному зовнішньому навантаженні. Крім того, при застосуванні таких робототехнічних комплексів відбувається заміна важкої ручної праці людини на функцію контролю за роботою самого РТК, тобто відбувається поліпшення умов праці робітників. З підвищенням продуктивності праці відбувається зниження собівартості деталі, і як наслідок — зниження її ціни.

Отримані результати теоретичних та експериментальних визначень і досліджень міцнісних якостей елементів рухомого складу (на прикладі хребтової балки вантажного вагону з використанням сучасного пакету програм) можуть сприяти підвищенню безпеки руху вантажних вагонів, дозволять покращити техніко-економічні показники роботи залізничного транспорту. **Вп**

References:

1. Neduzha, L. O., & Shvets, A. O. (2018). Theoretical and experimental research of strength properties of spine beam of freight cars. *Science and Transport Progress*, 1(73), 131-147. doi: 10.15802/stp2018/123457.
2. Neduzha, L. O., & Shvets, A. O. (2016). Using a modern software package for solving engineering problems in railway transport. *Lokomotyv-Infom*, 5-6, 42-44.
3. Myamlin, S. V., Neduzha, L. A., & Shvets, A. A. (2013). Technical condition of sliders as one of the factors influencing the dynamics of freight cars. *Collection of scientific works DonIRT*, 35, 65-72.
4. Myamlin, S. V., Neduzha, L. A., & Shvets, A. A. (2014). Determining the impact of friction parameters in the «body-bogie» on the dynamics of freight cars. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2 (50), 152-163. doi: 10.15802/stp2014/23792.
5. Myamlin, S. V., Neduzha, L. O., & Shvets, A. O. (2018). *Research of Dynamics and Strength of Freight Cars*. Dnipro : «Svidler A.L.».
6. Ten, A. A. Experimental Researching of Dynamic Loading of Low-Sided Car on LongRange Bogies / A. A. Ten, S. V. Myamlin, L. A. Neduzhaya // *Car fleet [Vagonniy park]*. – 2014. – Vol. 10. – P. 14-18.
7. Kalivoda, J. Experimental Research Experience with Rolling Stock Stand Equipment / J. Kalivoda, L. Neduzha // *Car fleet [Vagonniy park]*. – 2017. – Vol. 3-4. – P. 28-30.
8. Kalivoda, J. Enhancing the Scientific Level of Engineering Training of Railway Transport Professionals / J. Kalivoda, L. O. Neduzha // *Science and Transport Progress*. – 2017. – Vol. 6 (72). – P. 128-137. doi: 10.15802/stp2017/119050.
9. Neduzha, L. O., & Shvets, A. A. (2016). Application of apm WinMachine software for design and calculations in mechanical engineering. *Science and Transport Progress*, 2(62), 129-147. doi: 10.15802/stp2016/67328.
10. Tatarinova, V. A. Application of Software Tools in the Research of Vehicles [Zastosuvannya programnikh kompleksiv pri doslidzhenni stanu transportnikh zasobiv] / V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha // *Visnik sertifikatsii zalizничного транспорту*. – 2018. – Vol. 04 (50). – P. 82-91.
11. Komp' yuterne modelyuvannya zalizничних transportnikh zasobiv: metod. vkazivki do vikonannya praktichnikh robot, kursovogo ta diplomnogo proektuvannya / M. I. Kapitsa, J. Kalivoda, L. O. Neduzha, O. B. Ochkasov, D. V. Chernyaev. – D.:DNUZT, 2018. – 59 s.