

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПОДОСЬОНОВ ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 629.17:629.46

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ П'ЯТНИКОВИХ ВУЗЛІВ
ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ
ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ

Спеціальність 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів
Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Д. О. Подосьонов

Науковий керівник: Мурадян Леонтій Абрамович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри Управління та експлуатація рухомого складу Українського державного університету науки і технологій

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Подосьонов Д. О. Підвищення надійності п'ятникових вузлів вантажних вагонів шляхом удосконалення технології їх відновлення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 «Рухомий склад залізниць та тяга поїздів» (Галузь знань 27 – Транспорт). – Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2025.

Дисертація присвячена розв'язанню актуального науково-прикладного завдання з підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів. Зокрема, у теоретичному аспекті розроблено модель і запропоновано вирази для визначення стану зносу п'ятникового вузла з прогнозуванням міжремонтного ресурсу, що на практиці дає змогу зменшити витрати на ремонт завдяки підвищенню міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів. Загалом по роботі можна зробити такі висновки.

У першому розділі виконано аналіз несправностей вантажних вагонів, що призвели до транспортних подій. Визначено необхідність у підвищенні міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів. Розглянуто технологічні методи ремонту та підвищення зносостійкості п'ятникових вузлів. У результаті застосування техніко-економічного критерію встановлено, що найпривабливішими технологічними методами є лазерне та плазмове наплавлення. Незважаючи на високу вартість цих методів, вони забезпечують найвище значення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів. Для ремонту п'ятникових вузлів у нашому дослідженні запропоновано застосування досить простого методу контактного наварювання. Він не потребує додаткового спеціального обладнання, тобто можуть бути використані промислові трансформатори й інші засоби вагоноремонтних підприємств.

У другому розділі виконано дослідження експлуатаційного зносу п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів. Встановлено, що відчеплення в передчасний ремонт за граничним зносом підп'ятника відбувається за прогнозного значення пробігу вантажного вагона 174 тис. км, а за зносом п'ятника прогнозний міжремонтний ресурс становить 320 тис. км. Тобто ресурсовизначальним елементом вантажного вагона є підп'ятник, який має недостатній міжремонтний ресурс, і для досягнення величини міжремонтного пробігу 300 тис. км необхідно підвищувати його зносостійкість. У результаті дослідження було побудовано епюри зносу підп'ятників надресорних балок візків дослідної групи вантажних вагонів, для яких характерний нерівномірний розподіл за діаметром, що, зі свого боку, призводить до скорочення міжремонтного ресурсу й постановки вагона на передчасний ремонт. Знос п'ятників вантажних вагонів мав характер нерівномірного розподілу за діаметром. На основі побудованих епюр зносу підп'ятників запропоновано розподіляти твердість матеріалу за діаметром для забезпечення рівномірного зносу в експлуатації. Це також дасть змогу збільшити міжремонтний ресурс вантажних вагонів. Для цього рекомендовано застосовувати спосіб контактного наварювання попередньо сформованих композиційних стрічок з дискретною твердістю за довжиною (та/або шириною). Запропоновані заходи нададуть можливість збільшити міжремонтний пробіг і зменшити фінансові витрати, необхідні на утримання та ремонт вантажних вагонів.

У третьому розділі наведено результати теоретичних досліджень міжремонтного ресурсу візків вантажних вагонів, у яких ресурсовизначальним елементом є п'ятниковий вузол. Для встановлення меж розподілу відновлюваного матеріалу по діаметру підп'ятника було розглянуто втомний процес зносу під час взаємодії з п'ятником і описано геометрію поверхні зносу підп'ятника. Крім того, було запропоновано математичну модель для визначення вихідної геометрії поверхні підп'ятника на відповідному життєвому циклі візка вантажного вагона. Розглянуто взаємодію

циліндричних поверхонь пари тертя «п'ятник – підп'ятник» вантажного вагона й вперше отримано залежність величини зносу підп'ятника від пробігу, що враховує силове навантаження, фізико-механічні та триботехнічні властивості матеріалів сполучених поверхонь. На основі отриманої залежності на прикладі піввагона моделі 12-7023 встановлено, що середня величина зносу його підп'ятника досягає 2 мм на пробігу 80 тис. км. Під час розгляду взаємодії елементів пари «п'ятник – підп'ятник» вантажного вагона у момент прикладання зусилля тяги запропоновано вираз для визначення зазору. Теоретично обґрунтовано застосування композиційних стрічок для наварювання їх на циліндричну поверхню підп'ятника. Розглянуто раціональний розподіл концентрації наповнювача в композиційній стрічці, у результаті якого отримано залежність, яка характеризує потрібний розподіл концентрації наповнювача композиційної стрічки за діаметром підп'ятника з урахуванням фізико-механічних властивостей елементів, які взаємодіють у п'ятниковому вузлі, та властивостей композиційної стрічки, за умов забезпечення рівномірного зносу в кожній точці циліндричної поверхні підп'ятника. Установлено, що в разі застосування композиційної стрічки під час ремонту п'ятникового вузла вантажного вагона відбувається підвищення міцнісних та зносостійких властивостей циліндричної поверхні підп'ятника, тобто в процесі експлуатації відремонтованого вагона зміниться і величина зносу, яка є меншою в 2...2,7 рази порівняно з базовим варіантом. Прогнозований міжремонтний ресурс п'ятникового вузла піввагона з відремонтованими підп'ятниками з навареною композиційною стрічкою становлять 320 тис. км (за зносом п'ятника ця величина в 2,0...3,0 рази вище), що вказує на доцільність застосування запропонованих технологічних заходів.

У четвертому розділі наведено результати дослідження фізико-механічних та триботехнічних властивостей відновлених поверхонь п'ятникового вузла, що підтвердило теоретичні передумови щодо підвищення його міжремонтного ресурсу. Стендові дослідження показали, що величина зносу підп'ятників, відремонтованих навареними композиційними стрічками,

у 2,7...5,6 рази менша порівняно з величиною зносу підп'ятників, відремонтованих за допомогою наплавлення, і в 1,6...4,3 рази нижче порівняно з величиною зносу підп'ятників з установленими зносостійкими елементами. Сумарні величини зносу п'ятникового вузла вантажного вагона залежно від пробігу за умови повного завантаження становлять: з підп'ятниками, відремонтованими автоматичним наплавленням під шаром флюсу – 0,82 мм на 10 тис. км пробігу; з підп'ятниками зі зносостійкими елементами – 0,5 мм на 10 тис. км пробігу. Сумарна величина зносу поверхонь п'ятникового вузла з підп'ятниками, відремонтованими навареними композиційними стрічками, менша в 2,7...4,7 рази порівняно з цим показником для підп'ятників, відремонтованих за допомогою наплавлення, і в 1,6...3,5 рази нижче порівняно з величиною сумарного зносу п'ятникових вузлів з підп'ятниками, в які встановлені зносостійкі елементи.

У п'ятому розділі наведено результати експлуатаційних досліджень з визначення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів моделі 12-7023, які також підтвердили доцільність застосування контактного наварювання зносостійких композиційних стрічок. Установлено, що поверхні підп'ятника, відновлені наварюванням композиційних стрічок складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ і Fe-Cr-Ni-TiC, за станом зносу не потребували передчасного ремонту. До того ж величина зносу для пробігу 510 тис. км становила 5,8...6,1 мм. Прогнозні значення міжремонтного ресурсу підп'ятника піввагона моделі 12-7023 за станом зносу відповідають пробігу 660 тис. км і 680 тис. км для двох випадків складу композиційних стрічок. Прогнозування міжремонтного ресурсу за допустимим зносом діаметрів п'ятників піввагона моделі 12-7023 показало, що пробіг до ремонту для підп'ятників з навареними композиційними стрічками складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ становить близько 1 млн км, а для підп'ятників з навареними композиційними стрічками складу Fe-Cr-Ni-TiC – 740 тис. км. Крім того, виконана техніко-економічна оцінка запропонованих технологічних рішень підтвердила їхню доцільність. Загальний економічний ефект застосування запропонованої технології

відновлення підп'ятника контактним наварюванням зносостійкої композиційної стрічки становить 79 991,85 грн, а строк окупності – 1,9 року.

Ключові слова: ремонт, знос, вантажний вагон, п'ятник, підп'ятник, ресурс, експлуатація, прогнозування, відновлення, зміцнення.

ABSTRACT

Podosyonov D. O. Development and improvement of existing technologies of resource-determining surfaces of freight cars. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.22.07 “Railway rolling stock and train traction” (Field of knowledge: 27 – Transport). – Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, 2025.

The dissertation is devoted to solving the current scientific and applied problem of increasing the service life of the foot assemblies of freight cars. At the same time, in the theoretical aspect, a model has been developed and expressions have been proposed for determining the state of wear of the foot assembly with the forecast of the service life, which in practical terms allows reducing repair costs by increasing the service life of the foot assemblies of freight cars. In general, the following conclusions can be drawn from the work.

In the first section, an analysis of the faults of freight cars that led to transport incidents was carried out. As a result, the need to increase the service life of the foot assembly of freight cars was identified. Therefore, technological methods for repairing and increasing the wear resistance of the foot assemblies were considered, as a result of applying the technical and economic criterion, it was established that the most attractive technological methods are laser and plasma surfacing, despite the high cost of these methods, they provide the highest value of the service life between repairs of foot assemblies. Taking into account the simplicity of application, it was proposed to use contact welding for repairing foot assemblies. This method does not require additional special equipment, that is, industrial transformers and other means of wagon repair enterprises can be used.

In the second section, a study of the operational wear of foot assemblies and thrust washers of the spring beams of freight wagon bogies was carried out. As a result of the conducted studies of the operational wear of the thrust bearings and thrust bearings of the bogie beams of freight cars, it was established that the uncoupling for premature repair when forecasted for the ultimate wear of the thrust bearing occurs when the freight car has run for 174 thousand km, and for the wear of the thrust bearing, the forecasted service life is 320 thousand km. That is, the resource-intensive element of the freight car is the thrust bearing, which has an insufficient service life, and to achieve the service life of 300 thousand km, it is necessary to increase its wear resistance. As a result of the study, diagrams of wear of the thrust bearings of the bogie beams of the experimental group of freight cars were constructed, which are characterized by an uneven distribution in diameter, which, in turn, leads to a reduction in the service life and the car being put on premature repair. The wear of the fifth wheels of freight cars was of a uniform distribution along the diameter. Based on the constructed diagrams of the wear of the thrust bearings, it was proposed to distribute the hardness of the material along the diameter to ensure uniform wear in operation and, accordingly, to increase the service life of freight cars. For this purpose, it was proposed to use composite strips with discrete hardness along the length (and/or width) and the technological process - contact welding of pre-formed composite strips. The proposed measures will make it possible to increase the service life and reduce the financial costs required for the maintenance and repair of freight cars.

The third section presents the results of theoretical studies of the service life of freight car bogies, in which the thrust bearing assembly is the resource-generating element. To establish the boundaries of the distribution of renewable material along the diameter of the thrust bearing, the fatigue wear process during interaction with the thrust bearing was considered and the geometry of the thrust bearing wear surface was described. At the same time, a mathematical model was proposed to determine the initial geometry of the thrust bearing surface during the corresponding life cycle of the freight car bogie. The interaction of the cylindrical surfaces of the

friction pair “thrust bearing – thrust bearing” of a freight car was considered and the dependence of the thrust bearing wear value on the mileage was obtained for the first time, which takes into account the force load, physical-mechanical and tribotechnical properties of the combined materials. Based on the obtained dependence on the example of gondola 12-7023, it was established that the average wear of the thrust bearing of this gondola reaches 2 mm with a mileage of 80 thousand km. When considering the interaction of the elements of the pair "thrust bearing - thrust bearing" of a freight car at the moment of applying traction force, an expression for determining the gap is proposed. The use of composite strips for welding them onto the cylindrical surface of the thrust bearing is theoretically justified. The rational distribution of the filler concentration in the composite strip is considered, as a result of which a dependence was obtained that characterizes the required distribution of the filler concentration of the composite strip along the length of the thrust bearing diameter, taking into account the physical and mechanical properties of the interacting elements of the thrust bearing assembly and the properties of the composite strip, while ensuring uniform wear at each point of the cylindrical surface of the thrust bearing. It has been established that when using a composite tape during the repair of the freight car's footrest assembly, the strength and wear-resistant properties of the cylindrical surface of the thrust bearing increase, i.e. during the operation of the repaired car, the wear value will also change, which is 2...2.7 times less than in the base version. The predicted service life between overhauls of the footrest assembly of a gondola car with repaired thrust bearings with welded composite tape is 320 thousand km (this value is 2.0...3.0 times higher due to footrest wear), which indicates the feasibility of applying the proposed technological measures.

The fourth section presents the results of the study of the physical, mechanical and tribotechnical properties of the restored surfaces of the piston assembly, which confirmed the theoretical prerequisites for increasing the service life of the piston assemblies. Bench studies have shown that the wear rate of repaired thrust bearings with welded composite strips is 2.7...5.6 times lower than the wear rate of thrust

bearings repaired by surfacing and 1.6...4.3 times lower than the wear rate of thrust bearings with installed wear-resistant elements. The total wear rates of the piston assembly at full load of the freight car, depending on the mileage with repaired thrust bearings by automatic surfacing under a layer of flux, are 0.82 mm per 10 thousand km of mileage; with repaired thrust bearings with wear-resistant elements – 0.5 mm per 10 thousand km of run. The total wear of the surfaces of the thrust assembly with repaired thrust bearings welded on with composite strips is 2.7...4.7 times less than the total wear of assemblies with thrust bearings repaired by surfacing and 1.6...3.5 times lower than the total wear of thrust assemblies with thrust bearings in which wear-resistant elements are installed.

The fifth section presents the results of operational studies to determine the service life between overhauls of thrust assemblies of freight cars of model 12-7023, which also confirmed the feasibility of using contact welding of wear-resistant composite strips. It was established that the restored surfaces of the thrust bearing by welding composite strips with the composition Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ and Fe-Cr-Ni-TiC did not require premature repair in terms of wear, in addition, the amount of wear at a mileage of 510 thousand km was 5.8...6.1 mm. The predicted values of the service life between overhauls of the thrust bearing of the gondola car model 12-7023 in terms of wear are 660 thousand km and 680 thousand km of mileage, respectively, for the two cases. Forecasting the service life between overhauls based on the permissible wear of the diameters of the thrust bearings of the gondola car model 12-7023 showed that the mileage before repair for thrust bearings with welded composite strips Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ is about 1 million. km, and for thrust bearings with welded composite strips Fe-Cr-Ni-TiC – 740 thousand km. In addition, the performed technical and economic assessment of the proposed technological solutions confirmed their feasibility. The overall economic effect of applying the proposed technology of restoring the thrust bearing by contact welding with a wear-resistant composite strip is 79991.85 UAH, and the payback period is 1.9 years.

Keywords: repair, wear, freight car, thrust bearing, thrust bearing, resource, operation, forecasting, restoration, strengthening

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у фахових виданнях України:

1. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., **Подосьонов Д. О.** Підвищення надійності вантажних вагонів із застосуванням нових технологій виготовлення та відновлення робочих поверхонь. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. № 11. С. 49–54. (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (Особисто здобувачем: запропоновано метод контактного наварювання зносостійких композиційних стрічок для відновлення поверхонь п'ятникового вузла вантажного вагона)
2. Мурадян Л. А., **Подосьонов Д. О.** Підвищення міжремонтного ресурсу візків вантажних вагонів. Модель геометрії зносу підп'ятника. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 1 (65). С. 79–87. (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (Особисто здобувачем: виконано аналіз зносів підп'ятників та запропоновано модель геометрії зносу підп'ятника)
3. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., **Подосьонов Д. О.** Залежність величини зносу пари тертя «п'ятник – підп'ятник» від пробігу вантажного вагона. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 6. С. 61–69. (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (Особисто здобувачем: побудовано залежність середньої величини зносу підп'ятника для випадків із різними значеннями коефіцієнта використання пробігу)

Статті у міжнародних виданнях та у виданнях, які включено до науково-метричних баз:

4. Baranovskyi D., Myamlin S., Muradian, L., Bulakh M., **Podosonov D.** Determination of the Filler Concentration of the Composite Tape. *Appl. Sci.* 2022. 12(21), 11044. <https://doi.org/10.3390/app122111044>. (Scopus, Web of Science) (Особисто здобувачем: обґрунтовано застосування контактної зварювання)

при використанні композиційної стрічки із змінними трибомеханічними властивостями)

5. Baranovskyi D., Myamlin S., **Podosonov D.**, Muradian L. Determination of the filler concentration of the composite material to reduce the wear of the central bowl of the rail truck bolster. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023. Vol. 14, is. 12. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102232>. (Scopus) (Особисто здобувачем: отримано математичну модель розподілу концентрації наповнювача в проєктованій композитній стрічці)
6. Мурадян Л. А., **Подосьонов Д. О.** Збільшення міжремонтного ресурсу вантажних вагонів з використанням дискретного розподілення твердості матеріалу. *Вагонний парк*. 2017. № 3-4. С. 62–64. (Особисто здобувачем: запропоновано технічні рішення до удосконалення п'ятникового вузла вантажного вагона)
7. Мямлін С. В., Мурадян Л. А., **Подосьонов Д. О.** Підвищення надійності п'ятникового вузла вантажного вагону. *Залізничний трансп. України*. 2018. № 1. С. 34–41. (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.) (Особисто здобувачем: проведено аналіз технологічних методів підвищення зносостійкості вагонних деталей).

Статті у фахових виданнях України:

8. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., **Подосьонов Д. О.**, Піценко І. В. Дослідження несправностей пасажирських вагонів. Сучасний рух науки: тези доп. IX міжнарод. науково-практ. інтернет-конф., 2-3 грудня 2019 р. Дніпро : Редакція Міжнарод. Електрон. науково-практ. журн. «WayScience», 2019. Т.2. С. 548–553. (Особисто здобувачем: виконано аналіз пошкоджень вагонів в експлуатації)
9. Мурадян Л.А., **Подосьонов Д.О.** Аналіз пошкоджень вантажних вагонів на ПАТ «Українська залізниця» / Матеріали 76 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» 19-20.05.2016. С. 22-23. (Особисто здобувачем: отримано

результати експлуатаційних досліджень стану зносу п'ятникових вузлів вагонів)

10. Мурадян Л. А., **Подосьонов Д. О.** Підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів. *Матеріали 78-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*, 17-18.05.2018. Дніпро, 2018. С. 40–41. (Особисто здобувачем: отримано залежність зносу центральної колодки від пробігу, враховуючи силове навантаження, фізико-механічні та триботехнічні властивості взаємодіючих матеріалів)
11. Мурадян Л. А., **Подосьонов Д. О.** Експериментальні дослідження взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла. *Матеріали 79-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. 16-17.05.2019. Дніпро, 2019. С. 59–61. (Особисто здобувачем: проведено експериментальні дослідження взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла)
12. Мурадян Л.А., Шапошник В. Ю., **Подосьонов Д.О.** Експериментальні дослідження взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла вантажних вагонів / *Матеріали 81 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. 22-23.04.2021 Дніпро С. 38-39. (Особисто здобувачем: рапропоновано технологічний процес контактного наварювання п'ятникових вузлів вантажних вагонів).

ЗМІСТ

ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПАРКУ ЗА ПОКАЗНИКАМИ НАДІЙНОСТІ ПАРКУ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ, МЕТОДИ РЕМОНТУ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ.....	23
1.1 Аналіз несправностей вузлів вантажних вагонів на українських залізницях.....	23
1.2 Методи ремонту та підвищення зносостійкості п'ятникових вузлів вантажних вагонів	28
Далі розглянемо техніко-економічне обґрунтування вибору методів ремонту та підвищення зносостійкості п'ятникових вузлів	45
Висновки до розділу 1	46
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЗНОСІВ П'ЯТНИКІВ І ПІДП'ЯТНИКІВ НАДРЕСОРНИХ БАЛОК ВІЗКІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ	48
2.1 Методика дослідження	48
2.2 Результати дослідження	59
2.3 Забезпечення рівномірного зносу п'ятникових вузлів.....	65
Висновки до розділу 2	68
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ МІЖРЕМОНТНОГО РЕСУРСУ П'ЯТНИКОВОГО ВУЗЛА ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ	70
3.1 Модель геометрії зносу підп'ятника.....	70
3.2 Взаємодія циліндричних поверхонь пари тертя «п'ятник – підп'ятник» .	75
3.3 Визначення зазору в сполученні «п'ятник – підп'ятник»	83

3.4 Застосування матеріалів з дискретною міцністю та зносостійкістю для ремонту підп'ятників	87
3.5 Отримання композиційних стрічок для підвищення зносостійкості п'ятникових вузлів вантажних вагонів	97
3.6 Величина зносу підп'ятника та міжремонтний ресурс п'ятникового вузла	100
Висновки до розділу 3	103
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ СПОЛУЧЕНИХ ПОВЕРХОНЬ П'ЯТНИКОВОГО ВУЗЛА	105
4.1 Методика досліджень структури, елементного складу та фізико-механічних властивостей відновлених поверхонь п'ятникового вузла	105
4.2 Результати досліджень структури, елементного складу й фізико-механічних властивостей відновлених поверхонь п'ятникового вузла	109
4.2.1 Структура та склад відновлених поверхонь	109
4.2.2 Мікротвердість сформованих поверхневих шарів циліндричної поверхні підп'ятника	114
4.2.3 Пористість поверхневих шарів	119
4.2.4 Внутрішні напруження у сформованому шарі	121
4.2.5 Міцність зчеплення циліндричної поверхні підп'ятника і композиційної стрічки	123
4.3 Методика дослідження величини зносу відремонтованої поверхні підп'ятника	124
4.3.1 Дослідження величини зносу зразків	124
4.3.2 Методика стендових досліджень величини зносу підп'ятників	126
4.4 Результати досліджень величини зносу п'ятникових вузлів	127
4.4.1 Аналіз величини зносу дослідних зразків	127

4.4.2 Стендові випробовування п'ятникових вузлів.....	133
Висновки до розділу 4	138
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЖРЕМОНТНОГО РЕСУРСУ П'ЯТНИКОВИХ ВУЗЛІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ	142
5.1 Методика експлуатаційних досліджень.....	142
5.2 Експлуатаційні дослідження стану зносу п'ятникового вузла.....	145
5.3 Міжремонтний ресурс п'ятникового вузла	150
5.4 Техніко-економічна оцінка запропонованих технологічних рішень.....	151
Висновки до розділу 5	155
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	161

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Залізничний транспорт у всьому світі займає вагомую частку ринку послуг, які пов'язані з організацією та забезпеченням перевізного процесу. Тож основним завданням залізниць є підвищення рівня безпеки руху поїздів. Важливу роль у цьому відіграють такі показники, як надійність і безвідмовність рухомого складу, ліній електропередач та зв'язку, пристроїв блокування, а також стан і профіль колії.

Безпека руху поїздів та техніко-економічні показники перевізної роботи в ПАТ «Українська залізниця» значною мірою пов'язані з технічним станом вантажного вагонного господарства. Останнім часом для підвищення цих показників розглядається можливість збільшення міжремонтних пробігів вантажних вагонів без зниження рівня безпеки руху поїздів. Досягнення цієї мети можливе з використанням двох підходів. Перший пов'язаний з розробкою нових зразків вантажного рухомого складу зі збільшеним міжремонтним пробігом та виготовленням окремих нових елементів для вагонів, що експлуатуються, наприклад візків та колісних пар, з підвищеними фізико-механічними та триботехнічними властивостями. Другий передбачає застосування нових, більш ефективних технологій ремонту вантажних вагонів, що забезпечують необхідне підвищення міцнісних та зносостійких властивостей наявних експлуатованих зразків для збільшення їхнього міжремонтного пробігу.

Перший варіант, звичайно, є більш необхідним, оскільки понад 80 % експлуатованого вантажного рухомого складу є морально зношеним. Але станом на сьогодні ПАТ «Українська залізниця» не має можливості одночасно замінити декілька тисяч зразків вагонної техніки, що експлуатується і якій продовжено термін служби, оскільки для цього необхідно залучати валютні кредити та лізингові контракти. Тож, з огляду на нинішнє економічне становище України, другий напрямок є більш прийнятним для ПАТ

«Українська залізниця», оскільки не потребує залучення значних фінансових вкладень.

Одним із ресурсовизначальних вузлів вантажних вагонів є пара «п'ятник – підп'ятник», від технічного стану якої залежить загальний міжремонтний пробіг вагона. У процесі експлуатації вантажних вагонів відбувається нерівномірний знос п'ятникового вузла, що пов'язано з інтенсивністю проходження вагонів кривими колії малого радіуса. Як результат за станом зносу підп'ятник потребує передчасного ремонту. Забезпечення нормативно встановленого та підвищення міжремонтного ресурсу вантажного вагона з використанням технологічних методів поліпшення фізико-механічних та триботехнічних властивостей сполучених поверхонь п'ятникового вузла є актуальним завданням, розв'язання якого повинно ґрунтуватися на застосуванні сучасних, більш ефективних методів забезпечення необхідного рівня зносостійкості й міцності відновлюваних деталей візка вантажного вагона під час ремонту.

Проблемами підвищення надійності та міжремонтного ресурсу рухомого складу займалися такі відомі вчені, як: Абашкін В. В., Андрієвський В. Г., Боднар Б. Є., Борзилов І. Д., Босов А. А., Гайдамака А. В., Горбенко А. П., Горобець В. Л., Девятков В. Ф., Донченко А. В., Іванов С. Г., Капіца М. І., Лосєв А. В., Мартинов І. Е., Мямлін С. В., Перов С. В., Устіч П. О., Цюренко В. М., Чебаненко В. М., Шавшишвілі А. Д., Шевченко В. В. та ін. Питання підвищення надійності рухомого складу та удосконалення системи його технічного обслуговування та ремонту вивчали Бабанін О. Б., Боднар Б. Є., Босов А. А., Бутько Т. В., Войнов К. М., Головінов Г. Г., Головка В. Ф., Дьомін Ю. В., Капіца М. І., Кельріх М. Б., Мартинов І. Е., Мямлін В. В., Савчук О. М., Тартаковський Е. Д. та інші.

Питання надійності, визначення й подовження ресурсу вузлів залізничного транспорту та впровадження їх в практику досліджували такі вітчизняні й зарубіжні вчені: Броек Д., Бурчак Г. П., Вершинський С. В., Воронін М. М., Данилов В. М., Ірвін Дж., Ісаєв І. П., Кисельов С. М., Колінз

Дж., Костенко М. О., Котуранов В. М., Лозбінев В. П., Мапусіта Х., Матвеевичев О. П., Нікольський Є. М., Нікольський Л. М., Нотта Дж., Паріс П., Попов О. О., Райс Дж., Савоськин О. М., Сіраторі М., Мієсі Т., Соколов М. М., Устич П. А., Хеллал К., Хусідов В. Д., Шадур Л. А. та інші видатні вчені.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетних напрямків розвитку залізничної галузі, визначених у Транспортній стратегії України до 2030 року (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 №1550), а також пов'язана з науково-дослідною роботою, що виконувалася Українським державним університетом науки і технологій, за темами: «Дослідження зразків вагонної техніки у дослідних маршрутах на напрямку Роковата–Ужгород–Кошице» (ДР № 0106U002252), «Розробка інноваційних конструкцій вантажних вагонів з урахуванням зниження енергозатрат в результаті застосування нових технологій зварювання» (№ ДР 0114U0025), у яких автор брав участь як співавтор звітів.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів шляхом використання технологічних методів поліпшення фізико-механічних та триботехнічних властивостей їхніх сполучених поверхонь.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати несправності вузлів вантажних вагонів на залізницях України, розглянути та виконати техніко-економічне обґрунтування вибору методів ремонту та підвищення зносостійкості поверхонь п'ятникових вузлів;
- дослідити експлуатаційні зноси п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів та запропонувати рішення щодо забезпечення рівномірного зносу п'ятникових вузлів;
- виконати теоретичне обґрунтування підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів з використанням

технологічних методів поліпшення фізико-механічних та триботехнічних властивостей його сполучених поверхонь;

- дослідити фізико-механічні та триботехнічні властивості відновлених поверхонь п'ятникового вузла;
- виконати експлуатаційні дослідження з визначення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів;
- надати техніко-економічну оцінку запропонованих технологічних рішень.

Об'єктом дослідження – п'ятниковий вузол вантажного вагона як вузол, що обмежує міжремонтний ресурс, у процесі його відновлення і подальшої експлуатації.

Предмет дослідження – технологічні методи підвищення зносостійкості сполучених поверхонь п'ятника і підп'ятника шляхом формування модифікованого поверхневого шару з покращеними фізико-механічними та триботехнічними властивостями.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань у дисертаційній роботі застосовано елементи теорії прийняття рішень, теорія математичної статистики, теорія надійності технічних систем, методи математичного моделювання, експериментальні та аналітичні дослідження, методи системного підходу, аналізу та синтезу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

- вперше розроблено математичну модель для кількісної оцінки зносу циліндричної поверхні підп'ятника, яка з урахуванням фізико-механічних і триботехнічних властивостей матеріалів п'ятникового вузла, а також дії сумарних сил у поперечному та поздовжньому напрямках, дозволяє прогнозувати величину зносу залежно від експлуатаційних умов;
- вперше розроблено аналітичні залежності для визначення зазору в сполученні «п'ятник – підп'ятник», які враховують зміну геометричного положення контактних поверхонь унаслідок зносу елементів п'ятникового вузла під час експлуатації вантажного вагона. Запропоновані вирази

дозволяють оцінювати зазор з урахуванням як початкових конструктивних параметрів, так і накопичених змін форми поверхонь у процесі роботи;

- удосконалено математичну модель зношування підп'ятника надресорної балки візка вантажного вагона, яка, на відміну від існуючих, враховує опорний стан підп'ятника та дозволяє визначати зміну його геометрії на різних етапах експлуатації при заданих початкових умовах;

- набув подальшого розвитку метод контактного наварювання зносостійких композиційних стрічок, що, на відміну від існуючих методів наплавлення та встановлення зносостійких елементів, передбачає наварювання на поверхню зносу підп'ятника композиційних стрічок різної товщини з дискретними зносостійкими властивостями. Також запропоновано залежність для визначення концентрації наповнювача композиційної стрічки з урахуванням властивостей матеріалів, що взаємодіють у п'ятниковому вузлі вантажного вагона.

Практичне значення отриманих результатів. Наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, а також запропоновані вирази, розроблені моделі та підходи можуть бути використані для розв'язання завдання з підвищення міжремонтного ресурсу вантажних вагонів та безпеки руху поїздів на залізницях України та інших держав на різних етапах експлуатації.

Загальний економічний ефект застосування запропонованої технології відновлення підп'ятника контактним наварюванням зносостійкою композиційною стрічкою становить 79 991,85 грн, а строк окупності – 1,9 року.

Отримані результати роботи впроваджені:

- у ремонтних вагонних депо «Батуринська» та «Нижньодніпровськ-Вузол», для яких надані рекомендації щодо технології відновлення сполучених поверхонь п'ятникового вузла контактним наварюванням зносостійкими композиційними стрічками (акти впровадження відповідно від 14.10.2017; 14.04.2017);

- у навчальному процесі в ході підготовки спеціалістів та магістрів зі спеціальності 7(8).07010502 «Вагони та вагонне господарство» та під час дипломного проєктування (акт впровадження від 06.02.2025).

Практичне впровадження результатів роботи підтверджується відповідними документами, що наведені в додатку.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, розробки та результати теоретичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно.

В друкованих працях, опублікованих у співавторстві, особисто дисертанту належить: [1] запропоновано метод контактного наварювання зносостійких композиційних стрічок для відновлення поверхонь п'ятникового вузла вантажного вагона; [2] виконано аналіз зносів підп'ятників та запропоновано модель геометрії зносу підп'ятника; [3] побудовано залежність середньої величини зносу підп'ятника для випадків із різними значеннями коефіцієнта використання пробігу; [4] обґрунтовано застосування контактного зварювання при використанні композиційної стрічки із змінними трибомеханічними властивостями; [5] отримано математичну модель розподілу концентрації наповнювача в проєктованій композитній стрічці; [6] запропоновано технічні рішення до удосконалення п'ятникового вузла вантажного вагона ; [7] Проведено аналіз технологічних методів підвищення зносостійкості деталей вантажних вагонів; [8] виконано аналіз пошкоджень вагонів в експлуатації; [9] отримано результати експлуатаційних досліджень стану зносу п'ятникових вузлів вантажних вагонів; [10] отримано залежність зносу центральної колодки від пробігу, враховуючи силове навантаження, фізико-механічні та триботехнічні властивості взаємодіючих матеріалів; [11] проведено експериментальні дослідження взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла; [12] Запропоновано технологічний процес контактного наварювання п'ятникових вузлів вантажних вагонів..

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та були схвалені на 76-й, 78-й та 79-й

міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, УДУНТ, 2016, 2018, 2019 рр.).

У повному обсязі дисертація була оприлюднена та схвалена на міжкафедральному науковому семінарі в Українському державному університеті науки і технологій (21.04.2025 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 11 наукових працях, з яких: 8 – наукові статі, надруковані у фахових виданнях, з них 2 – у закордонних виданнях та в журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних; 3 публікації апробаційного характеру і тези доповідей, що увійшли до матеріалів міжнародних наукових конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи становить 176 сторінок, які містять 64 рисунків та 7 таблиць; список використаних джерел із 123 назв; 2 додатків.

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПАРКУ ЗА ПОКАЗНИКАМИ НАДІЙНОСТІ ПАРКУ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ, МЕТОДИ РЕМОНТУ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ

1.1 Аналіз несправностей вузлів вантажних вагонів на українських залізницях

Вантажні вагони зазвичай експлуатуються в специфічних умовах. Агресивний вплив вантажу, пошкодження під час операцій завантаження та розвантаження, значні експлуатаційні навантаження, зношений рухомий склад, незадовільний стан колії тощо призводять до пошкодження і спрямування вагонів у ремонт [1]. Графічно розподіл несправностей вагонів, що призвели до транспортних подій, за період 2014–2016 рр. за даними департаменту вагонного господарства Укрзалізниці наведено на рис. 1.1. Він вказує на позитивну динаміку зниження несправностей гальмівного обладнання, кузовів, буксових вузлів, візків та колісних пар вагонів; іншу динаміку (підвищення) – мають автозчепи.

Проаналізувавши дані, можна стверджувати, що найбільша кількість несправностей вантажних вагонів – до 51 % – мають технологічний характер, до 39 % – експлуатаційний характер та до 10 % відбуваються з інших причин. Тобто останнім часом збільшилася кількість пошкоджень рухомого складу, які мають технологічний характер. Це зумовлено тривалим терміном служби рухомого складу, недостатнім забезпеченням ремонтних депо матеріалами та запчастинами, їхньою низькою якістю, зниженням матеріальної зацікавленості працівників ремонтних підприємств і повільним впровадженням сучасного діагностувального обладнання.

Експлуатаційний характер несправностей виникає через природний знос елементів, деталей і вузлів вагона в процесі експлуатації і не пов'язаний з якістю виготовлення або ремонтом.

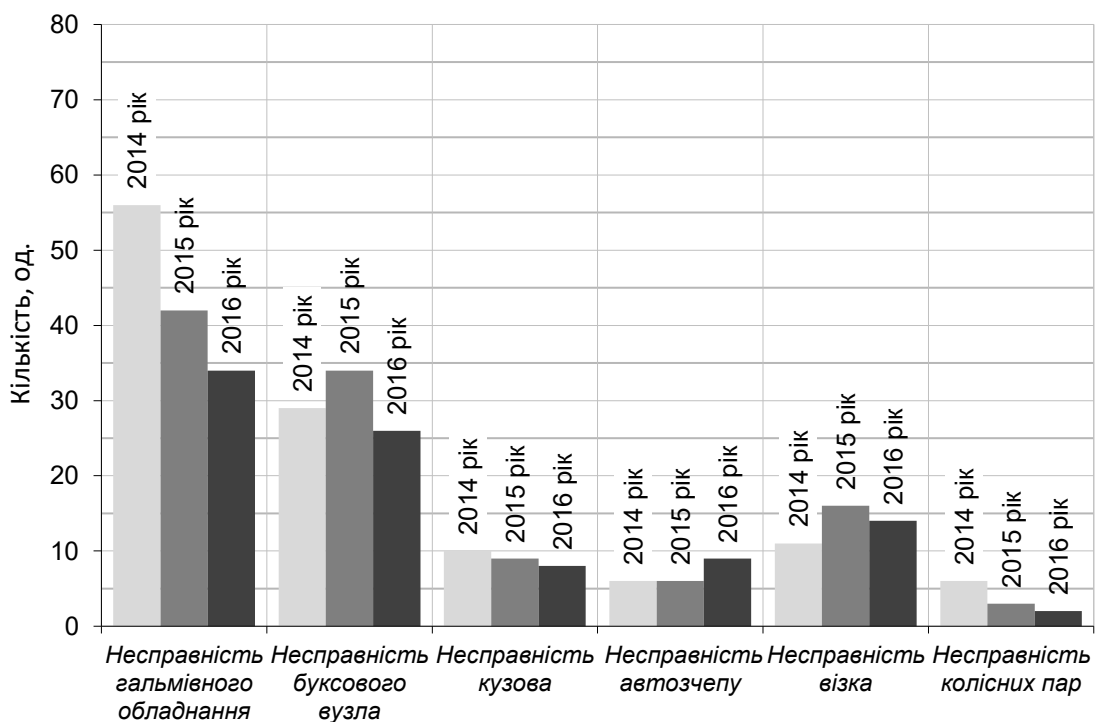


Рисунок 1.1 – Розподіл несправностей вузлів вагонів, що призвели до транспортних подій, за період 2014-2016 рр.

Інші пошкодження відбуваються через порушення встановлених правил експлуатації вантажних вагонів на коліях загального користування й коліях промислових підприємств.

Порівняння результатів відмов вагонів за типами продемонструвало, що найбільш відмовонебезпечними, тобто найбільш витратними за обсягом робіт і першорядними за увагою щодо безпеки руху та збереження вантажу, є піввагони, на які припадає до 58 % відмов. На парк інших вагонів (мінераловози, зерновози, цементовози) припадає до 14 %; на криті вагони – до 10 %; цистерни й платформи – до 9 % відмов.

На сьогодні гострим питанням у вагонному господарстві залізниць України є якість виконання планового ремонту візків, а саме:

- на похилих площинах надресорних балок не видаляються раніше приварені пластини з подальшим наплавленням та механічним обробленням;
- не усуваються зноси опорних поверхонь буксових прорізів бокових рам та п'ятникових вузлів;

- не виконується заміна фрикційних планок, які мають понаднормативний знос;

- не здійснюється заміна послаблених заклепок кріплення фрикційних планок та не усуваються інші несправності.

Одним з прикладів неякісного виконання ремонту є вагон № 68829829, у якому 21.06.2016 на станції Попільня регіональної філії «Південно-Західна залізниця» виявлено приварені металеві пластини в підп'ятнику та ступінчасті зноси бурта підп'ятника в чотирьох точках, які впиралися в напливи металу на циліндричній поверхні п'ятника (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Ремонтні дефекти п'ятникового вузла вагона № 68829829

В інших випадках під час обстеження надресорних балок візків установлено, що глибина зносу опорних поверхонь підп'ятників, упорних поверхонь зовнішніх і внутрішніх буртів різко зросла. Це може бути пов'язано з підвищенням інтенсивності переміщень п'ятників відносно підп'ятників.

Додатковий вплив відбувається в умовах кромкового обпирання підп'ятників на підп'ятники й подальшого їх відносного повороту під час проходження кривих, що в результаті призводить до максимальної глибини зносу опорної поверхні підп'ятників. Інтенсивність такого зносу може становити до 3 мм на рік.

У ході експлуатації вантажних вагонів відбувається нерівномірний знос підп'ятника, що пов'язаний з інтенсивністю проходження вагонів кривими колії малого радіуса [34,37,50]. До того ж відбувається нерівномірне збільшення навантажень у візку вантажного вагона (розвантаження одного буксового вузла, надмірне збільшення навантаження на протилежний буксовий вузол тощо).

Аналіз умов роботи та результатів експлуатації надресорних балок візків вантажних вагонів з низьколегованих сталей марок 20ГЛ, 20ФЛ і 20ГФЛ, що належать до ферито-перлітного класу, показав [34, 50], що ці деталі під час роботи в умовах сухого тертя та за наявності високих контактних і ударних навантажень мають низьку зносостійкість за інтенсивності зносу робочих поверхонь 1,2...2,0 мм на 100 тис. км пробігу.

Застосування на залізничному транспорті маловуглецевих і низьколегованих зварювальних матеріалів забезпечує міжремонтний пробіг відремонтованих деталей усього 160 тис. км, що відповідає 2 рокам експлуатації [34, 50]. Деталь за весь термін служби піддається ремонту наплавленням до 10 разів. За щорічної потреби в ремонті вантажних вагонів 100 тис. одиниць витрати залізничного транспорту на відновлення литих деталей вантажних вагонів обчислюються мільярдами гривень. Зменшити знос робочих поверхонь литих деталей вагонів останні 10-15 років намагалися за рахунок застосування різних способів поверхневого зміцнення та встановлення прокладок зі зносостійкої сталі [45, 48]. Досвід застосування об'ємно-поверхневого гартування, електро-імпульсної обробки, індукційного, плазмово-порошкового, дугового наплавлення високолегованим дротом ферито-мартенситного класу литих деталей вагонів і встановлення на них

зносостійких елементів зі сталі марки 30ХГСА продемонстрував [45, 48], що на сьогодні не існує універсального, ефективного й надійного захисту від зносу внаслідок тертя. Наявність ударних навантажень у зоні контакту деталей надресорної балки завадило можливості застосування матеріалів високої твердості, адже їм властива підвищена крихкість.

Для збільшення міжремонтного пробігу експлуатованих вантажних вагонів виникає необхідність у підвищенні фізико-механічних та триботехнічних властивостей основних деталей візка, таких як надресорна балка та бічні рами. Варто зауважити, що понад 20 % відчеплень вантажних вагонів у поточний ремонт пов'язані з наднормативною величиною зносу поверхонь тертя, що в 1,2...1,5 раза перевищує гранично допустимі значення [44]. Після виконаного ремонту в понад 15 % вантажних вагонів не забезпечується регламентований нормативний пробіг 120 тис. км. Більше ніж 80 % деталей вантажних вагонів відновлюються технологічними методами [34, 50]: наплавленням або напилюванням, у разі потреби, у комплексі з механічною обробкою. Описані технологічні методи ремонту деталей візка не забезпечують величину нормативно встановленого міжремонтного пробігу, а значення ресурсу становить 65...75 % від ресурсу нових зразків.

Недосконалість застосовуваних технологічних методів відновлення всіх, а особливо навантажених, деталей візка вантажного вагона є головною причиною підвищеної інтенсивності їх зносу [41, 50], що, зі свого боку, через подальшу можливу втрату працездатного стану деталей візка призводить до зниження безпеки руху поїздів та збільшення фінансових витрат, необхідних для виконання позапланових ремонтів візків.

Отже, завдання, що полягає в забезпеченні нормативно встановленого міжремонтного пробігу вантажного вагона з використанням технологічних методів підвищення фізико-механічних та триботехнічних властивостей деталей візка вантажного вагона, є актуальним, його розв'язання повинно ґрунтуватися на застосуванні сучасних, більш ефективних методів

забезпечення необхідного рівня зносостійкості та міцності відновлюваних деталей.

1.2 Методи ремонту та підвищення зносостійкості п'ятникових вузлів вантажних вагонів

Останнім часом увагу дослідників різних напрямків привертають властивості робочих поверхонь елементів та деталей, які є ресурсовизначальними для вантажних вагонів [2,5,14,15,40,51]. Навчитися створювати поверхні тертя із заданими властивостями й керувати фізико-хімічними процесами, що відбуваються в них, – одне з першочергових завдань, що стоїть перед фахівцями залізничного транспорту, які виготовляють, експлуатують, обслуговують і ремонтують рухомий склад. Знос складових елементів п'ятникового вузла є дестабілізатором технічного стану вантажних вагонів. Забезпечити керований ресурс вагонів у цьому випадку можливо стабілізацією стаціонарного технічного стану трибосистем п'ятникового вузла, тобто стабілізацією експлуатаційних властивостей цих елементів. Останнє досягається за допомогою застосування різних технологій, спрямованих на підвищення фізико-механічних і триботехнічних характеристик сполучених поверхонь п'ятникового вузла [40,51,75].

У світовій практиці якість технології оцінюється не тільки високими технічними, але й економічними показниками [114]. Перевага віддається високоефективним безвідходним і ресурсозберігаючим технологіям, які забезпечують високу якість і надійність виробів. Особливу цінність технології набувають у тому випадку, якщо вони, використовуючи відходи виробництва, забезпечують деталям властивості, які не поступаються нинішнім.

Підвищення ресурсу та довговічності п'ятникових вузлів вантажних вагонів пов'язано з необхідністю застосування різних способів зміцнення деталей, водночас їхні експлуатаційні властивості (зносостійкість, динамічна

і циклічна міцність) повинні перевищувати відповідні показники для нових деталей. Тому технологія зміцнення п'ятникових вузлів вантажних вагонів має базуватися на використанні таких способів і засобів зміцнення і механічної обробки, які разом з високою продуктивністю допомагають не тільки зберегти, але й істотно підвищити довговічність цих сполучених елементів [2,5,14,15,40,51]. Таким чином, однією з проблем підвищення зносостійкості та довговічності сполучених елементів п'ятникових вузлів вантажних вагонів стає розробка нових ефективних і екологічно чистих технологій відновлення.

Аналіз технологічних методів підвищення зносостійкості сполучених елементів п'ятникових вузлів вантажних вагонів [43,54] показав, що для збільшення їхнього ресурсу може бути застосовано одночасно кілька різних технологічних методів відновлення, оскільки в комплексі з конструкторськими рішеннями, правильним підходом до процесу експлуатації вантажних вагонів це дасть найбільший ефект.

Застосування відомих технологічних методів підвищення зносостійкості сполучених елементів п'ятникових вузлів вантажних вагонів [35,36,42] дає змогу зменшити їх знос у 1,2...3,0 рази, проте вони мають і певні недоліки. Наприклад, основними недоліками об'ємної термообробки є:

- деформації елемента та деталі в процесі загартування;
- значні залишкові напруження;
- нерівномірна твердість за глибиною елемента чи деталі;
- видалення вуглецю з поверхні елемента чи деталі;
- можливість утворення гартівних тріщин, особливо в разі великого перерізу;
- висока енергоємність процесу.

Поверхнева хіміко-термічна обробка є одним з найпоширеніших методів підвищення зносостійкості деталей машин [15,40,51], але до її недоліків варто віднести високу вартість і тривалість. Серед основних недоліків легування і модифікування можна виокремити підвищену витрату матеріалів, оскільки легувальний елемент розподіляється у всьому об'ємі заготовки, а зносу

піддається не весь об'єм деталі. Для уведення легувальних елементів у сталь або чавун необхідно здійснювати значне нагрівання металу, що неможливо в умовах вагоноремонтного депо, а в разі виплавки в електропечах внаслідок високого перегріву чавун має дрібнозернисту структуру, що негативно позначається на його зносостійкості. За умов великої маси елемента чи деталі і невеликих розмірів граничного зносу легування матеріалу в повному об'ємі є економічно нераціональним, оскільки призводить до великої витрати легувальних елементів. Більш ефективним, порівняно з об'ємним легуванням [51], є метод поверхневого (локального) легування. Його використання веде до зниження загальної вартості виливків і дає можливість отримати зносостійкі робочі поверхні з поліпшеними властивостями, як за високого легування матеріалу деталі. До недоліків способу слід віднести малий припуск на механічну обробку й можливість повного видалення легованого шару в процесі обробки. Спосіб потребує точних методів виливки.

До нових перспективних процесів легування заготовок можна віднести лазерне легування. Високі можливості лазерів визначаються локалізацією термічного впливу й управління процесом у широкому діапазоні технологічних режимів. Широке впровадження лазерного зміцнення деталей вантажних вагонів у масове виробництво можливо, якщо врахувати тривалість періоду обробки й характеристики технологічного обладнання.

Характеристики міцності деталей, що працюють в умовах змінного навантаження, можуть бути підвищені в кілька разів за рахунок застосування поверхневої пластичної деформації [6].

Для підвищення корозійної стійкості на деталі наносять покриття електролітичними або хімічними методами, а також здійснюють цинкування, кадміювання, нікелювання, фосфатування, лудіння або комбінують названі процеси. Крім того, зносостійкість і корозійну стійкість елемента та деталі підвищують наплавленням на робочі поверхні твердих сплавів [15,40,44,51]. Наплавлення широко застосовують для відновлення та зміцнення зношених елементів та деталей вагонів.

З усіх технологічних методів підвищення зносостійкості сполучених елементів п'ятникових вузлів вантажних вагонів для створення поверхонь із заданими змінними властивостями теоретично можуть бути використані такі:

- управління структуроутворенням у процесі відливання;
- поверхневе (місцеве) легування;
- поверхнева термічна обробка;
- зміцнення пластичним деформуванням;
- термомеханічна обробка;
- лазерне гартування, легування і модифікування.

Зміцнення деталей шляхом модифікування поверхні має первні переваги порівняно з нанесенням зміцнювальних покриттів. В останнє десятиліття почали використовувати лазерну модифікацію поверхонь тертя. Але широкого застосування цей спосіб не збув: по-перше – висока вартість; по-друге – однозначних висновків щодо його ефективності (100 % позитивних або негативних) дослідники ще не зробили.

Під час лазерного модифікування впливу підлягає шар основного матеріалу елемента чи деталі, товщиною і властивостями якого можна управляти за рахунок технологічних параметрів процесу обробки. Цей процес можна реалізувати без спеціальних операцій підготовки поверхні. Крім того, можна відмовитися від використання дорогих легувальних елементів. Найважливішою перевагою цього способу є те, що модифікована поверхня є єдиним цілим з основою.

Для вирішення питань захисту поверхні деталей від абразивного, корозійного, механічного зносу та зносу внаслідок тертя, а також для ремонту з одночасним підвищенням експлуатаційних властивостей поверхні широкого застосування набули захисні покриття, що наносяться різними методами газотермічного напилювання. За допомогою напилювання можна створювати надійний захист поверхонь елементів та деталей вагонів. Крім того, способи напилювання дозволяють відновлювати дорогі деталі з відносно невеликими витратами матеріалу, часу і фінансів, що дає значну економію металу. До

групи промислово розвинених методів газотермічного напилювання відносять електродугове (металізація), високошвидкісне (надзвукове) газополуменеве, полуменеве й детонаційне. Усі вони об'єднані єдиним принципом формування покриття з окремих частинок, нагрітих і прискорених за допомогою високотемпературного газового струменя (рис. 1.3). Структура покриттів, отриманих цими методами, шарувата, утворена дискретними частинками з досить яскраво вираженими межами розділу.

За останні роки було витрачено багато зусиль на створення нових, більш продуктивних розпилювальних апаратів і нових матеріалів для нанесення покриттів, а також автоматизацію цих процесів, що значно знизило собівартість нанесення покриттів і розширило галузь їхнього застосування.



Рисунок 1.3 – Процес газотермічного напилювання

Переваги технології напилювання такі:

- можливість нанесення покриттів на вироби, виготовлені практично з будь-якого матеріалу;
- можливість напилення різних матеріалів за допомогою одного й того самого обладнання;
- відсутність обмежень за розміром оброблюваних виробів. Покриття можна напилити як на велику площу, так і на обмежені ділянки великих виробів;

- можливість застосування для збільшення розмірів деталі (відновлення та ремонт зношених деталей вагонів);
- відносна простота конструкції обладнання для напилювання, його мала маса, простота експлуатації обладнання для напилювання, можливість швидко і легко переміщатися;
- можливість широкого вибору матеріалів для напилювання;
- незначна деформація виробів під впливом напилювання. Багато способів поверхневої обробки деталей потребують нагрівання до високої температури всього виробу або значної його частини, що часто стає причиною його деформації;
- можливість використання напилювання для виготовлення деталей вагонів різної форми;
- простота технологічних операцій напилювання, відносно невелика трудомісткість, висока продуктивність нанесення покриття;
- відсутність спеціальної дорогої обробки (очищення) деталей, що забруднює навколишнє середовище, на відміну від засобів очищення й нейтралізації при гальванічних видах обробки виробів.

Напилювання має відмітні риси, про які необхідно знати для правильного вибору технології нанесення покриттів для кожного конкретного випадку. Для вибору оптимального способу нанесення покриття варто враховувати:

- форму і розміри деталей;
- вимоги, що ставляться до точності нанесення покриття, його експлуатаційні властивості;
- витрати на основне й допоміжне обладнання, наплавні матеріали й гази, на попередню й остаточну обробку покриттів;
- умови праці та інші фактори виробничого й соціального характеру.

Головним критерієм застосовності матеріалу як покриття є можливість переведення його частинок в розплавлений або високопластичний стан і подальша їхня деформація в момент зустрічі з підкладкою. Високі

температури в поєднанні з можливістю широкого регулювання складу струменя (інертний, відновний, окислювальний) і швидкості його закінчення забезпечують велику різноманітність матеріалів, що напилюються за допомогою газотермічних методів, – від найбільш тугоплавких металів, оксидів, карбідів тощо й до пластмас.

Малий термічний вплив на напилювану основу (зазвичай 80...250 °C) дозволяє виключити небажані структурні перетворення в ній, уникнути деформації деталей, створює можливість нанесення покриття на основу з найрізноманітніших матеріалів.

Товщина газотермічних покриттів [73,81] – від десятків мікрометрів до декількох міліметрів. Напилювання може виконуватися як на обмеженій ділянці деталі, так і на великих поверхнях практично без обмеження розмірів. Ці переваги зумовлюють високу універсальність газотермічного напилювання, яке дає змогу наносити покриття з широким спектром службового призначення – зносостійкі, корозійностійкі, теплозахисні, електроізоляційні та інші, а також для відновлення розмірів зношених деталей вагонів.

Найголовнішим фактором, що дає змогу визначити сферу застосування і експлуатаційні характеристики покриття, є міцність його зчеплення з основою (адгезія). Зчеплення металевих частинок з основою відбувається за рахунок механічного схоплення розпилюваних частинок з нерівностями, що притаманні відповідній шорсткості поверхні деталі.

На зчеплення впливають і усадкові напруження. Розтягуювальні напруження, що виникають в напиленому шарі в результаті напружень усадки, можуть досягти значної величини. Тільки через те, що шорстка поверхня поглинає розтягуювальні напруження, які виникають в напиленому шарі, тріщини утворюються дуже рідко і здебільшого тільки в тих випадках, коли метал має велику усадку. Адгезія дуже залежить від способу й чистоти підготовки поверхні перед напилюванням. Водночас вона значно збільшується

в результаті сплавлення або хімічної взаємодії напилюваних частинок з основою деталі.

Одним з видів газотермічного напилювання є газополуменеве напилювання, за якого джерелом теплової енергії є полум'я, що утворюється в результаті горіння суміші «кисень – горючий газ». Газополуменеве напилювання залежно від стану матеріалу деталі може бути трьох типів: дрогове, пруткове й порошкове. Крім цього, сюди ж відносять ще й детонаційне напилювання, що базується на використанні енергії детонації суміші «кисень – горючий газ».

Напилюваний матеріал у дроговому та прутковому газополуменевому напилюванні застосовується у вигляді дроту або прутка, які подаються через центральний отвір пальника й розплавляються в полум'ї. Струмінь стислого повітря розпилює розплавлений матеріал на дрібні частинки, які осідають на оброблюваній поверхні деталі. Подача дроту (пруги) здійснюється з постійною швидкістю роликами, що приводяться в рух вбудованою в пальник повітряною турбіною, яка працює на стисненому повітрі й використовується для напилювання, або електродвигуном через редукційний механізм. Для цього необхідне точне регулювання швидкості обертання турбіни або електродвигуна.

За останні роки зросла потреба в електродуговій металізації, яка надає найширші можливості порівняно з усіма відомими методами нанесення металопокриття (рис. 1.4). Із застосуванням електродугової металізації можна відновлювати деталі широкої номенклатури, забезпечувати тривалий антикорозійний захист алюмінієм і цинком труб, резервуарів та інших металоконструкцій, отримувати покриття з псевдосплавів, наприклад з алюмінію та сталі, міді та сталі, бронзи та сталі.



Рисунок 1.4 – Електродугова металізація

Через два канали в пальнику безперервно подають два дроти, між кінцями яких виникає дуга й відбувається розплавлення дроту. Розплавлений метал підхоплюється струменем стисненого повітря, що виходить з центрального сопла електрометалізатора, і в дрібнорозпиленому вигляді переноситься на поверхню основного матеріалу деталі. Розпилення й транспортування розплавленого металу здійснюються зазвичай стисненим повітрям, хоча в разі напилювання корозійностійкою сталлю й алюмінієвими сплавами використовують азот. Під час дугового напилювання на постійному струмі процес відбувається стабільно, забезпечуючи високу інтенсивність утворення шару покриття з дрібнозернистою структурою. Тому сьогодні для дугового напилювання застосовують джерела постійного електричного струму зі стабілізатором напруги або джерела з легкозростаючою характеристикою. Застосування потужних електрометалізаційних установок дозволяє значно підвищити продуктивність процесу і скоротити витрати часу.

Серед недоліків цього способу – небезпека перегріву й окислення напилюваного матеріалу за малих швидкостей подавання дроту. Крім того, велика кількість теплоти, що виділяється під час горіння дуги, призводить до значного вигорання легувальних елементів, що містяться в напилюваному матеріалі (наприклад, вміст вуглецю в матеріалі покриття знижується на 40-60 %, а кремнію і марганцю – на 10-15 %).

Під час нанесення шару покриття поверхня деталі нагрівається до 50...70°C, і це не викликає жодних структурних змін у металі деталі, тобто

його механічні властивості зберігаються. Завдяки цьому можна наносити шар покриття на деталі з будь-якого матеріалу. Металізація забезпечує високу твердість напилюваного шару, що сприяє збільшенню термінів служби відновлюваних деталей. Напилюють найрізноманітніші метали, наприклад, може бути використано біметалічний дріт з алюмінію і свинцю, що дає змогу не тільки замінювати дорогі олов'янисті бабіти й бронзи, а й значно збільшити термін служби деталей.

Проте необхідно враховувати, що металізований шар, нанесений на поверхню деталі, не підвищує її міцності. Тому застосовувати металізацію для відновлення деталей з ослабленим перерізом не варто. Відновлюючи деталі, що перебувають під дією динамічних навантажень, а також ті, що працюють під тертям без мастильних матеріалів, необхідно знати, що зчеплюваність напилюваного шару з основним металом деталі є недостатньою.

Отримання якісних покриттів можливо лише за умови строгого дотримання режимів і ретельної підготовки поверхонь деталей, що піддаються металізації.

Необхідну шорсткість на поверхні деталей, що підлягають металізації, отримують такими способами. На поверхні термічно необробленої круглої деталі на токарно-гвинторізному верстаті нарізають «рвану» різь різцем, установленим з великим вильотом нижче осі деталі на 3...6 мм. Часто нарізування різі замінюють більш продуктивним процесом – накаткою різі. Міцність зв'язку основного металу з покриттям при цьому дещо погіршується.

Продуктивність напилювання електричними апаратами залежить від застосовуваного матеріалу. Якщо режим напилювання обраний правильно, то за товщини покриття 0,5...0,7 мм поверхневий шар нагрівають до 70 °С; за товщини покриття 2...3 мм і більше температура цього шару досягає 100...150 °С. Нагрівання може стати причиною виникнення високих напружень. Для зменшення нагрівання деталі покриття наносять тонкими шарами окремими ділянками.

Твердість покриття можна регулювати добором вихідного матеріалу або режимом охолодження в процесі нанесення покриття.

Як зазначалося раніше, технологічний процес нанесення покриття змінюється залежно від форми деталі. На деталі з плоскими поверхнями покриття наносять найчастіше вручну. В окремих випадках для нанесення розпиленого матеріалу використовують металорізальні верстати. Під час напилювання покриттів плоских деталей виникає низка труднощів, які пов'язані насамперед з появою залишкових розтягувальних напружень, що прагнуть відірвати покриття від деталі. За товщини шару понад 0,3 мм можливий відрив покриття по кінцях плоских поверхонь.

Щоб запобігти сколюванню або викришуванню покриття по зовнішньому периметру, на плоскій поверхні роблять спеціальні канавки. Якщо товщина покриття перевищує 0,5 мм, підготовка деталі полягає в нарізанні канавок у формі хвоста ластівки з кроком 2...3 мм.

У деталей складної форми для закладення тріщин, раковин і плоских деталей застосовують піскоструминну обробку сухим кварцовим піском з розміром частинок 1,5...2 мм.

Також варто зауважити, що перспективним способом напилювання є застосування лазерних агрегатів. При цьому лазерне напилювання (рис. 1.5) буде мати певні переваги порівняно з іншими розглянутими способами. Зокрема, такі: висока швидкість; відсутність деформаційних процесів у відновлюваній деталі; отримання вищих фізико-механічних і триботехнічних властивостей покриття. Недоліком будуть залишатися більші грошові витрати.



Рисунок 1.5 – Лазерне напилювання

На основі самофлюсуючих сплавів (наплавлювальних, гранульованих, нікелевих) виготовляють композиції, у яких як наповнювач застосовують конгломеруючий карбід вольфраму або титану в кількості 35 %, 80 % і 85 %. Внаслідок дуже високої твердості карбиду вольфраму (WC) чи титану (TiC) покриття із сплавів цього типу особливо стійкі в умовах ерозійного та абразивного зносу.

Наявність в оплавлених покриттях карбидів та боридів хрому й висока мікротвердість покриттів ($2\,300 \dots 2\,500 \text{ кгс/мм}^2$) зумовлюють їхню стійкість до абразивної і ерозійної дії, а також дуже високу зносостійкість, яка приблизно в 10 разів більше, ніж у сталі. За даними [81], твердість покриттів з самофлюсуючих сплавів в 11 разів, а із сплавів, що містять карбід вольфраму чи титану, – у 33 рази вище твердості незагартованої сталі 45.

Особливо важливою властивістю оплавлених покриттів з самофлюсуючими порошками є термостійкість і хімічна стійкість в багатьох агресивних середовищах. Це пов'язано з тим, що початкова твердість таких покриттів за нагрівання до $500 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$ не змінюється та їх застосовують як термостійкі для роботи за високих температур. При оплавленні покриттів відбувається їхня усадка, що за об'ємом досягає 20 %. Щільність оплавленого шару становить $7,6 \dots 7,9 \text{ г/см}^3$ [81]. Технологічний процес наплавлення напилюванням є двостадійним і складається з двох окремих операцій: напилювання покриття і його оплавлення.

Далі розглянемо газове наплавлення, що є одним із способів зварювання плавленням. При цьому процес відбувається в умовах часткового оплавлення основного металу з використанням як джерела нагріву високотемпературного полум'я, що одержується в результаті спалювання суміші горючого газу з киснем.

Газове наплавлення забезпечує такі переваги [81]:

- незначне проплавлення основного металу;
- можливість наплавлення дрібних деталей складної форми;

- зменшення ймовірності виникнення тріщин, оскільки процес наплавлення передбачає попереднє підігрівання і подальше уповільнене охолодження деталі;

- низька вартість зварювального устаткування.

Водночас для газового наплавлення характерний такий недолік, як низька продуктивність у разі наплавлення масивних деталей, що потребують тривалого попереднього підігріву. Також варто зауважити, що її виконувати мають тільки зварники високої кваліфікації [81].

Плазмово-порошкове наплавлення (рис. 1.6) полягає у виникненні між основним металом і електродом пальника електричної дуги, що забезпечує перехід в стан полум'я робочого газу, що подається в зону дуги. Тоді із сопла пальника утворюється високотемпературний плазмовий струмінь, що забезпечує плавлення наплавочного матеріалу. Для утворення плазми використовують суміш гелію з аргоном, а як захисний газ застосовують аргон, що захищає зварювальну ванну й кристалізований наплавлений метал позаду плазмового пальника від дії навколишнього повітря. У разі наплавлення в умовах поперечних коливань плазмового пальника отримують півсферу шириною до 65 мм. Як наплавлювальні матеріали використовують порошкові сплави на основі заліза, нікелю й кобальту.

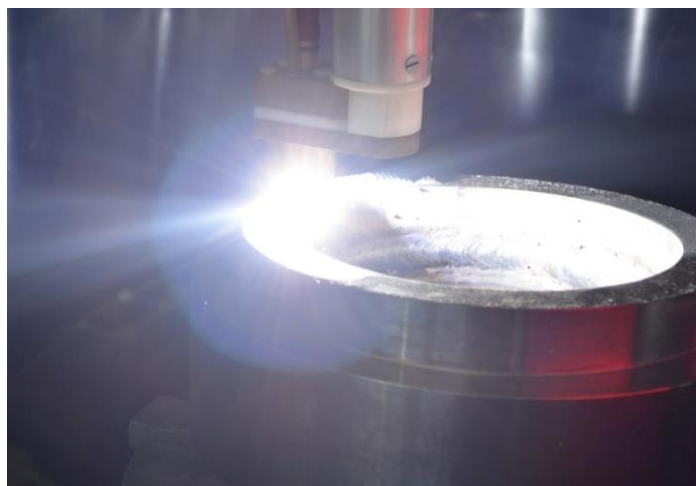


Рисунок 1.6 – Плазмово-порошкове наплавлення

Дугове наплавлення покритими електродами (рис. 1.7), що базується на використанні електродів у вигляді стрижнів з покриттям, здійснюють, звичайно, вручну, тому такий спосіб називають ще ручним дуговим наплавленням. Електродне покриття служить для захисту ванни рідкого металу від кисню та азоту повітря, стабілізації дуги, підвищення технологічності процесу наплавлення й введення легувальних елементів до складу наплавленого металу. Широкого застосування в практиці дугового наплавлення набули карбонатно-рутилове, основне й високорутилове покриття. До складу електродного покриття вводять також шлакоутворювальні та газоутворювальні компоненти, розкислювачі, стабілізаційні та легувальні добавки.



Рисунок 1.7– Дугове наплавлення покритим електродом

Дугове наплавлення покритим електродом відрізняється низькою вартістю обладнання, можливістю виконання наплавлення вручну, що забезпечує цьому способу найширше застосування для наплавлення не тільки чорних, але й кольорових металів. Ручне наплавлення поступається автоматичним і напівавтоматичним способам за швидкістю виконання процесу.

Дугове наплавлення під флюсом (рис. 1.8) полягає в тому, що дуга в разі наплавлення електродними матеріалами (дріт, стрічка) схована під шаром гранульованого флюсу, попередньо нанесеного на поверхню основного

металу. Можливість наплавлення за великої сили струму й високої погонної енергії забезпечує цьому способу високу продуктивність та гарну якість наплавленого металу. Завдяки цьому цей спосіб має найширше застосування в галузі автоматичного наплавлення.



Рисунок 1.8 – Дугове наплавлення під флюсом

Дугове наплавлення під флюсом має такі переваги [7,12]:

- висока продуктивність процесу у разі наплавлення деталей простої форми з великою площею поверхні, що наплавляється;
- простота здійснення процесу, що не потребує високої кваліфікації зварника;
- гарні умови праці, що пов'язані з відсутністю розбризкування електродного металу (оскільки дуга прихована під шаром флюсу).

Водночас цьому способу наплавлення притаманні такі недоліки [81]:

- вища вартість обладнання, ніж для ручного дугового наплавлення покритими електродами;
- непридатність для наплавлення дрібних виробів складної форми.

Наплавлення електродною стрічкою під флюсом (рис. 1.9) здійснюють за допомогою електрода у вигляді широкої сталевий стрічки, розташованої в процесі наплавлення практично під прямим кутом до основного металу.



Рисунок 1.9 – Наплавлення електродною стрічкою під флюсом

Наплавлення стрічковим електродом має такі переваги [81]:

- отримання плоскої півсфери наплавленого металу досить великої ширини (приблизно рівна ширині стрічкового електрода);
- можливість наплавлення шару необхідної товщини за один-два проходи, що зумовлено малою глибиною проплавлення основного металу й у зв'язку із цим незначним впливом його на склад наплавленого шару (частка становить 10–20 %);
- висока продуктивність у зв'язку з можливістю наплавлення з високою швидкістю за великої сили струму.

Розглянутий спосіб набув швидкого розвитку й широкого застосування для наплавлення різних деталей, в основному, під час ремонту.

Електродугове наплавлення порошковим дротом (рис. 1.10), тобто наплавлення без захисного середовища, здійснюється порошковим дротом за відсутності подавання флюсу або захисного газу в зону дуги.

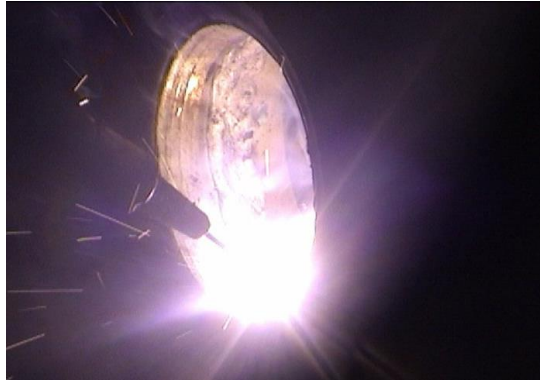


Рисунок 1.10 – Електродугове наплавлення порошковим дротом

Наплавлення відкритою дугою порошковим дротом має такі переваги [81]:

- простота використовуваного обладнання й технології, що пов'язана з відсутністю необхідності застосування захисного газу й флюсу;
- можливість наплавлення в польових умовах;
- порівняльна простота введення легувальних елементів у наплавлений метал, склад якого можна регулювати в широких межах.

Проблема наплавлення цим способом пов'язана з виділенням диму.

Також для відновлення поверхонь деталей можна використати лазерне наплавлення (рис. 1.11). Цей спосіб дозволяє забезпечити найвищий ступінь зчеплення наплавлювального й основного матеріалів. Якість наплавлення буде мати найкращі параметри, але цей спосіб буде вимагати більших фінансових витрат.

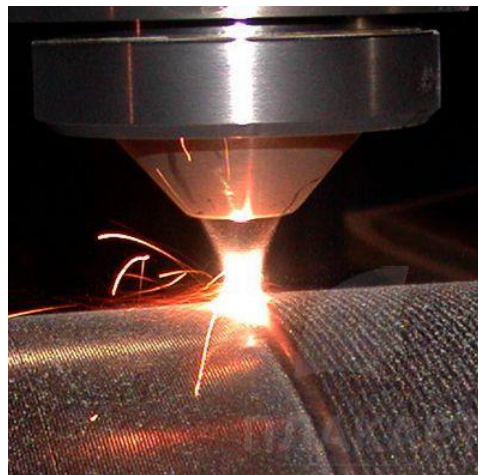


Рисунок 1.11 — Лазерне наплавлення

Далі розглянемо техніко-економічне обґрунтування вибору методів ремонту та підвищення зносостійкості п'ятникових вузлів .

Розглянуті технологічні методи ремонту та підвищення зносостійкості п'ятникових вузлів частково чи в повному обсязі застосовуються на вагоноремонтних підприємствах. Проаналізуємо їх з урахуванням техніко-економічного критерію та простоти застосування в умовах вагоноремонтних депо. Результати продемонструємо у вигляді діаграми відносних значень приведенного техніко-економічного критерію (відношення ресурсу до питомих фінансових витрат) технологічних методів ремонту та підвищення зносостійкості (рис. 1.12)

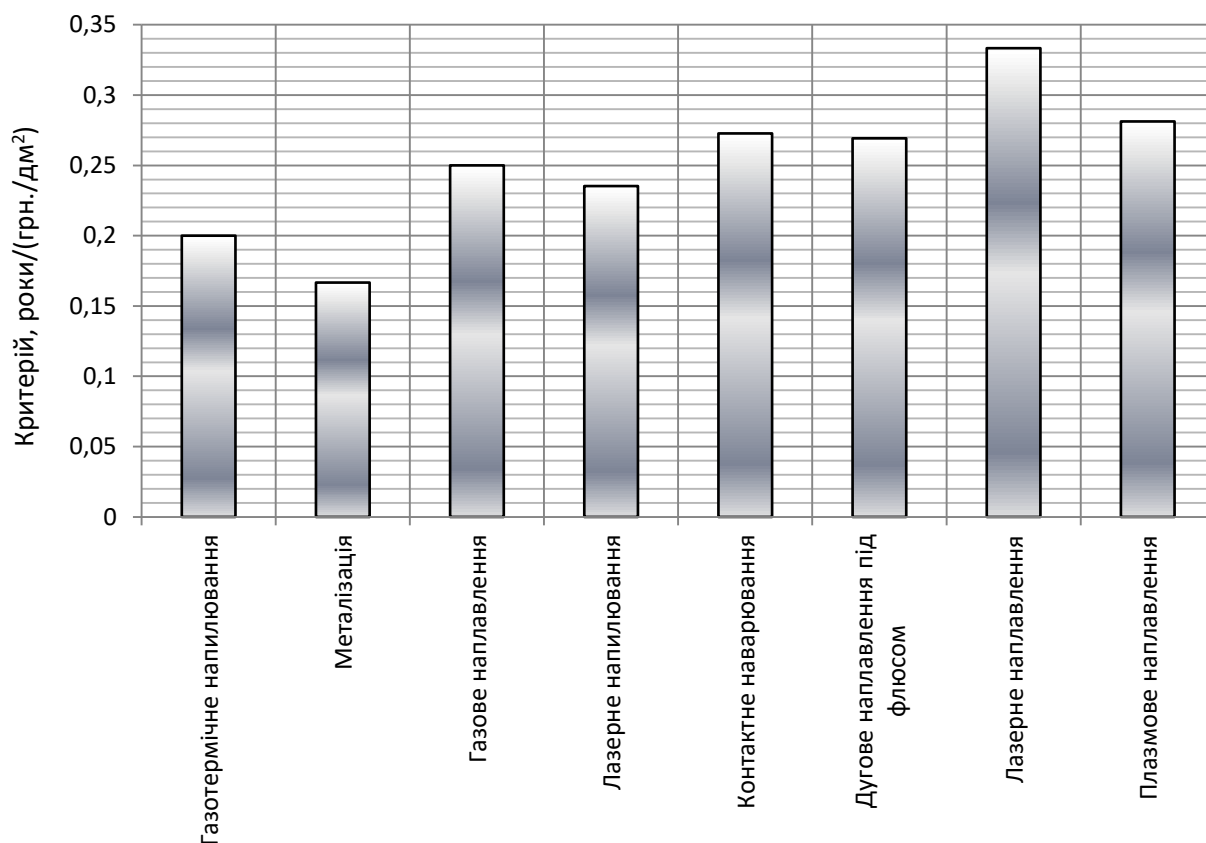


Рисунок 1.12 — Діаграма відносних значень приведенного техніко-економічного критерію (відношення ресурсу до питомих фінансових витрат) технологічних методів ремонту та підвищення зносостійкості

З наведеної діаграми (див. рис. 1.12) випливає, що найпривабливішими технологічними методами є лазерне та плазмове наплавлення. Незважаючи на високу вартість, вони забезпечують найвище значення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів. З позиції простоти застосування необхідно звернути увагу на технологічний метод контактного наварювання, який за техніко-економічним критерієм розташований на третьому місці й не застосовується для ремонту п'ятникових вузлів. Незважаючи на те, що цей метод досить простий у застосуванні й не вимагає спеціального обладнання (тобто можуть бути використанні промислові трансформатори та інші засоби вагоноремонтних підприємств), все ж він не набув великого поширення. Також заслуговують на увагу методи дугового наплавлення під флюсом і газового наплавлення, хоча вони набули (набули чи не набули? якщо все таки набули, то до чого тут хоча?) широкого застосування під час ремонту п'ятникових вузлів у вагонному ремонтному господарстві.

Висновки до розділу 1

На основі звітів Укрзалізниці про стан безпеки руху на залізницях України було виконано аналіз несправностей вантажних вагонів, що призвели до транспортних подій, за 2014-2016 рр.

Установлено, що понад 80 % візків вантажних вагонів є морально та фізично зношеними, що з кожним подальшим роком експлуатації буде призводити до накопичення дефектів в металі з утворенням тріщин через зниження втомної міцності, а також до раптових відмов вагонів. На сьогодні експлуатація вагонного парку відбувається в умовах підвищеного використання вантажопідйомності вагона й високих швидкостей руху. У результаті навіть в умовах руху на прямолінійних ділянках сила інерції досягає значень, що достатні для відриву п'ятників від поверхні підп'ятника. Під час обстежень надресорних балок встановлено, що глибина зносів опорних поверхонь підп'ятників, упорних поверхонь зовнішніх і внутрішніх бортів

різко зростає. Це пов'язано з підвищенням інтенсивності переміщень п'ятників відносно підп'ятників. Додатковий вплив відбувається в разі кромкового обпирання п'ятників на підп'ятники й подальшого їхнього відносного повороту під час проходження кривих, що в результаті призводить до максимальної глибини зносу опорної поверхні підп'ятників. Інтенсивність такого зносу може становити до 3 мм на рік. Під час експлуатації вантажних вагонів відбувається нерівномірний знос підп'ятника, що пов'язаний з інтенсивністю проходження вагонів кривим колії малого радіусу. При цьому відбувається нерівномірне збільшення навантажень у візку вантажного вагона (розвантаження одного буксового вузла, надмірне збільшення навантаження на протилежний буксовий вузол тощо).

У результаті виконаного аналізу було визначено необхідність у підвищенні міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів. Тому були розглянуті технологічні методи ремонту та підвищення зносостійкості п'ятникових вузлів. У результаті застосування техніко-економічного критерію встановлено, що найпривабливішими технологічними методами є лазерне та плазмове наплавлення. Незважаючи на їхню високу вартість, вони забезпечують найвище значення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів. Ураховуючи простоту застосування, було запропоновано застосування контактного наварювання для ремонту п'ятникових вузлів. Цей метод не вимагає додаткового спеціального обладнання, тобто можуть бути використанні промислові трансформатори й інші засоби вагоноремонтних підприємств.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЗНОСІВ П'ЯТНИКІВ І ПІДП'ЯТНИКІВ НАДРЕСОРНИХ БАЛОК ВІЗКІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

2.1 Методика дослідження

Дослідження експлуатаційних зносів п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів виконували на підприємствах Укрзалізниці в ремонтних вагонних депо «Батуринська» та «Нижньодніпровськ-Вузол». Кількість дослідних вантажних вагонів у групі становила 100 одиниць. За характером зносу підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів після взаємодії з п'ятником дослідна група ділилася на такі підгрупи:

- знос у всіх напрямках;
- знос у двох напрямках;
- знос однобічного характеру.

Метою дослідження було визначення інтенсивності експлуатаційних зносів і показників надійності дослідних вантажних вагонів.

Кожен дослідний вантажний вагон мав приблизно однакові умови експлуатації. Вантажні вагони мали пробіг на Придніпровській, Одеській, Південно-Західній та Львівській залізницях. Середня довжина одного рейсу становила 1350 км. Коефіцієнт використання пробігу 0,65. Завантаженість дослідної групи вантажних вагонів дорівнювала середньому загальномережевому значенню, характерному для магістральних залізниць з шириною колії 1520 мм.

Зі складу дослідної групи вантажних вагонів випадковим чином добиралося 10 зразків для повного обміру п'ятникових вузлів з метою контролю величин зносу. Обміри виконували в середньому через кожні 45 тис. км пробігу під час планових оглядів після прибуття порожніх вагонів для чергового завантаження. Одночасно виконували огляд технічного стану всієї

групи дослідних вантажних вагонів і, у разі потреби, робили додаткові контрольні вимірювання. Усі вимірювання величин зносу п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів здійснювали у вищезазначених ремонтних вагонних депо з підніманням і викочуванням візків.

Обробку масивів вимірювань величин зносу п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів здійснювали за два етапи:

- первинний – визначалися параметри нормального закону розподілу (математичне сподівання, середньоквадратичне відхилення, статистичний мінімум/максимум) масиву однотипних вимірювань під час кожного огляду;

- заключний – результати первинної обробки виміряного параметра за всіма виконаними оглядами описувалися функцією найкращого наближення (експоненціальною або лінійною) залежно від експлуатаційного пробігу вагона. Потім будувалися регресійні залежності величин зносу п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів.

Більшість фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей і процесів зносу (у будь-яких проявах) у структурних елементах вантажного вагона перебувають у постійному взаємному зв'язку. Дослідження взаємозалежностей між надійністю, властивостями та процесами зносу структурних елементів вантажного вагона є одним з визначальних завдань сучасної науки. Такі дослідження дають можливість глибше зрозуміти складний механізм причинно-наслідкових зв'язків між названими характеристиками. Для дослідження величини та інтенсивності зносу від напруження (пробігу) вантажного вагона, видів і форм таких залежностей широко застосовується кореляційно-регресійний аналіз, який є методичним інструментарієм для розв'язання задач прогнозування, планування й аналізу господарської діяльності залізниць.

Розрізняють два типи зв'язків між різними процесами зносу та їхніми ознаками [4]:

- функціональний (жорстко детермінований);

- статистичний (стохастично детермінований).

Функціональний зв'язок двох величин можливий лише за умови, що друга з них залежить тільки від першої. У реальних природних процесах такі зв'язки вкрай рідкісні.

Якщо зі зміною значення однієї величини друга змінна в певних межах може набувати будь-яких значень, а її середнє значення або інші статистичні (масові) характеристики змінюються за певним законом, то такий зв'язок є статистичним. Тобто в разі статистичного зв'язку різні значення однієї змінної відповідають різним розподілам значень іншої змінної.

Кореляційним зв'язком [4] називають найважливіший окремий випадок статистичного зв'язку, коли різним значенням однієї змінної відповідають різні середні значення іншої. Зі зміною значення деякої характеристики X закономірно змінюється середнє значення характеристики Y , у той час як в кожному окремому випадку значення характеристики Y (з різними проявами) може набувати безліч різних значень.

Якщо ж зі зміною значення характеристики X середнє значення характеристики Y не змінюється закономірно, але закономірно змінюється інша статистична характеристика (показники варіації, асиметрії, ексцесу тощо), то такий зв'язок є не кореляційним, а статистичним.

Статистичний зв'язок між двома характеристиками (змінними величинами) передбачає, що кожна з них має випадкову варіацію індивідуальних значень щодо середньої величини. Якщо ж таку варіацію має тільки одна з характеристик, а значення іншої є жорстко детермінованим, то можна говорити лише про регресію (наприклад, під час аналізу динаміки процесів зносу можна виміряти регресію рівнів величини зносу структурних елементів вантажного вагона залежно від напрацювання (пробігу)). Таким чином, одностороння ймовірнісна залежність між випадковими величинами є регресією.

Регресія щодо кількості змінних може бути простою (регресія між двома змінними) і множинна (регресія між залежною змінною Y і декількома змінними $(x_1, x_2, \dots, x_m)$, що її пояснюють) [4].

Щодо форми залежності регресія буває лінійною (виражається лінійною функцією) і нелінійною (виражається нелінійною функцією).

Для використання кореляційно-регресійного методу на практиці необхідно виконання таких умов [4]:

- наявність даних з досить великої сукупності. Їхня кількість залежить від мети аналізу, необхідної точності й надійності визначених параметрів зв'язку, від кількості факторів, що впливають на кореляційний зв'язок. Зазвичай приймається, що кількість спостережень має бути в 5-10 разів більшою, ніж кількість досліджуваних факторів;

- надійна інтерпретація (апроксимація) закономірностей середньою величиною;

- необхідність підпорядкування розподілу сукупності за результативними й факторними параметрами нормального закону розподілу ймовірностей.

Під час вивчення сутності кореляційного зв'язку ставляться такі основні завдання [4]:

- вимірювання параметрів рівняння, що виражає зв'язок середніх значень залежної змінної зі значеннями незалежної змінної – однієї або декількох (залежність середніх величин результативної ознаки від значень однієї або декількох факторних ознак);

- вимір тісноти зв'язку двох або більшої кількості ознак між собою.

Перше завдання вирішується оцінкою параметрів отриманого рівняння регресії. Друге – розрахунком відповідних коефіцієнтів кореляції. Друге завдання є специфічним для статистичних зв'язків, а перше використовується для функціональних зв'язків і є спільним.

Основним методом розв'язання задачі знаходження параметрів рівняння зв'язку є метод найменших квадратів [4], розроблений К. Ф. Гауссом. Він

полягає в мінімізації суми квадратів відхилень фактично виміряних значень залежної змінної у від її значень, обчислених за рівнянням зв'язку з факторною ознакою, що містить одну або декілька змінних x .

Для вимірювання тісноти зв'язку застосовується низка показників [12]. За парного зв'язку його тіснота вимірюється насамперед кореляційним відношенням, квадрат якого є відношенням міжгрупової дисперсії результативної ознаки, що виражає вплив відмінностей групувальної факторної ознаки на середню величину результативної ознаки, до загальної дисперсії результативної ознаки, що виражає вплив на неї всіх причин і умов. Квадрат кореляційного відношення має назву коефіцієнта детермінації і визначається за формулою

$$\eta^2 = \frac{\sum_{j=1}^k (\bar{y}_j - \bar{y})^2 * f_j}{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_j - \bar{y})^2}, \quad (2.1)$$

де k – кількість груп за факторною ознакою;

y_i – значення результативної ознаки для i -ї одиниці;

$\bar{y}$ – загальне середнє значення;

f_j – частота в j -й групі;

n – кількість одиниць у сукупності;

$\bar{y}_j$ – середнє значення у в j -й групі.

Найпростішою системою кореляційного зв'язку є лінійний зв'язок між двома змінними – парна лінійна кореляція. Практичне її значення полягає в тому, що є системи, у яких серед усіх факторів, що впливають на результативну ознаку, виокремлюється один найважливіший фактор, який переважно визначає варіацію результативної ознаки. Вимірювання парних кореляцій є необхідним етапом у вивченні складних багатфакторних зв'язків.

Рівняння парного лінійного кореляційного зв'язку є рівнянням парної регресії й має такий вигляд [4]:

$$\bar{y} = a + b x, \quad (2.2)$$

де $\bar{y}$ – середнє значення результативної ознаки y за певного значення факторної ознаки x ;

a – вільний член рівняння;

b – коефіцієнт регресії, що вимірює середнє відношення відхилення результативної ознаки від її середньої величини до відхилення факторної ознаки від її середньої величини на одну одиницю її виміру, тобто варіація y , що припадає на одиницю варіації x .

Як зазначалося раніше, параметри рівняння розраховуються методом найменших квадратів за даними про значення x і y досліджуваної сукупності, що складається з n одиниць, а початкова умова для прямої лінії має такий вигляд [4]:

$$f(a, b) = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + b x_i)]^2 \rightarrow \min. \quad (2.3)$$

Для відшукування значень параметрів a і b , за яких функція $f(a, b)$ буде набувати мінімального значення, часткові похідні цієї функції прирівнюються до нуля й у результаті певних перетворень отриманих рівнянь знаходять коефіцієнти a і b (для прямої лінії) за такими формулами [4]:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad a = \bar{y} - b\bar{x}. \quad (2.4)$$

Тіснота парного лінійного кореляційного зв'язку, як і будь-яка інша форма зв'язку, може бути виміряна кореляційним відношенням η . Крім того, за лінійної форми рівняння застосовується інший показник тісноти зв'язку –

коефіцієнт кореляції r_{yx} . Цей показник являє собою стандартизований коефіцієнт регресії, тобто коефіцієнт, виражений не в абсолютних одиницях виміру ознак, а в частках середнього квадратичного відхилення результативної ознаки [4]:

$$r_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y}; \quad (2.5)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\overline{x^2} - (\bar{x})^2}; \quad (2.6)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\overline{y^2} - (\bar{y})^2}. \quad (2.7)$$

Коефіцієнт кореляції може набувати значення $-1 \leq r \leq 1$, а за абсолютною величиною $0 \leq |r| \leq 1$. Від'ємні значення r_{yx} свідчать про зворотний зв'язок ознак y і x , додатні – про прямий зв'язок.

Зазвичай зв'язок вважають сильним, якщо $r > 0,7$; середнім – за $0,5 < r < 0,7$; слабким – за $r < 0,5$. Максимально тісний зв'язок проявляється, коли $r_{yxmax} = 1$.

Показники кореляційної зв'язку, обчислені за обмеженою сукупністю (вибіркою), є лише оцінками тієї чи іншої статистичної закономірності, оскільки в будь-якому параметрі зберігається елемент не в повному обсязі погашеної випадковості, що властиво індивідуальним значенням ознак. Тому потрібна статистична оцінка ступеня точності й надійності параметрів кореляції. Під надійністю треба розуміти ймовірність того, що значення параметра, яке не дорівнює нулю, не містить величини протилежних знаків.

Ймовірнісна оцінка параметрів кореляції виконується за загальними правилами перевірки статистичних гіпотез, що розроблені в математичній статистиці, зокрема шляхом порівняння оцінюваної величини із середньою

випадковою помилкою оцінки. Для коефіцієнта парної регресії b середня помилка оцінки обчислюється як

$$m_b = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 : (n - 2) / \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.8)$$

де $\hat{y}_i$ – розрахункові значення результативної ознаки для i -ї одиниці;
($n - 2$) – кількість ступенів свободи (втрачаються 2 ступені свободи, оскільки лінійна парна регресія має два параметри).

Знаючи середню помилку оцінки коефіцієнта регресії, можна обчислити ймовірність того, що нульове значення коефіцієнта входить в інтервал можливих (з урахуванням помилки) значень. Із цією метою знаходять відношення коефіцієнта до його середньої помилки, тобто t -критерій Стюдента:

$$t = \frac{b}{m_b}. \quad (2.9)$$

Розрахункове значення t -критерію Стюдента порівнюється з табличним (таблиці в довідниках «Значення t -критерію Стюдента при рівнях значимості 0,10; 0,05; 0,01»).

Якщо отримане (розрахункове) значення критерію набагато більше табличного, то ймовірність нульового значення коефіцієнта регресії менше ніж 10 %, 5 % або 1 % (залежно від обраного рівня значущості) і, відповідно, у сконструйованій регресійній моделі вплив фактора-аргументу x на фактор-результат y істотний.

Рівняння регресії можна застосувати й для прогнозування можливих очікуваних значень результативної ознаки. У цьому разі варто врахувати, що

перенесення (екстраполяція) закономірності зв'язку, яка вимірюється у варіюючій сукупності в статистиці, на динаміку не є коректним і вимагає перевірки умов допустимості такого рішення, яке виходить за межі статистики й може бути зроблено тільки фахівцем, що має хороші знання про об'єкт (вагон) і можливості його розвитку.

Обмеженням прогнозування на основі регресійного рівняння, тим більше парного, є умова стабільності або принаймні незначної зміни інших факторів і умов досліджуваного процесу, не пов'язаних з ними. Якщо різко зміняться умови роботи (або зовнішнє середовище), що будуть впливати на перебіг процесів зносу структурних елементів вагона, то колишнє (раніш отримане) рівняння регресії результативної ознаки (величини або інтенсивності зносу) втратить своє значення.

За такого прогнозування слід дотримуватися ще одного обмеження [4], що полягає в недопустимості підставляння значень факторної ознаки, які значно відрізняються від вхідних, у базисну інформацію, за якою обчислене рівняння регресії. За якісно інших рівнів фактора, якщо вони можливі в принципі, параметри рівняння були б іншими. Можна рекомендувати під час визначення значень факторів не виходити за межі $1/3$ розмаху варіації як мінімального, так і максимального значення самої ознаки-фактора, що наявний у вихідній інформації.

Прогноз, що отриманий підстановкою в рівняння регресії очікуваного значення фактора буде точковим прогнозом, а ймовірність точної реалізації такого прогнозу вкрай мала [4]. Необхідно супроводити його значенням середньої помилки прогнозу або довірчим інтервалом з досить великою ймовірністю. Середня помилка положення лінії регресії в генеральній сукупності даних за значення факторної ознаки x_k буде обчислюватися таким чином:

$$m_{\hat{y}(x_k)} = S_y \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_k - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (2.10)$$

де $m_{\hat{y}(x_k)}$ – середня помилка положення лінії регресії в генеральній сукупності за $x = x_k$;

S_y – оцінка середнього квадратичного відхилення результативної ознаки від лінії регресії в генеральній сукупності з урахуванням ступенів свободи варіації;

x_k – очікуване значення фактора;

$\bar{x}$ – середнє значення фактора за сукупністю;

n – об'єм вибірки.

Оцінку середнього квадратичного відхилення результативної ознаки від лінії регресії в генеральній сукупності можна знайти за формулою [4]

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n - 2}}. \quad (2.11)$$

Для обчислення довірчих меж прогнозу лінії регресії потрібно помножити її середню помилку на t -критерій Стюдента (як зазначалось, значення визначається з таблиць для різних ступенів свободи й рівнів значущості).

Середня помилка прогнозу для індивідуального значення за правилом дисперсії суми незалежних змінних утворюється з помилки прогнозу положення лінії регресії й середнього квадратичного відхилення індивідуальних значень від лінії регресії (залишкової варіації), тобто:

$$m_{y(x_k)} = \sqrt{m_{\hat{y}(x_k)}^2 + S_y^2}, \quad (2.12)$$

Головним джерелом помилки (невизначеності) прогнозу індивідуальних значень є не стільки невизначеність прогнозу лінії регресії, скільки велика варіація значень величин зносу структурних елементів вагона за рахунок інших факторів (саме умови та режими роботи вагона є вирішальними), крім зазначених у рівнянні регресії (напрацювання, пробіг, термін служби).

У дослідній групі вантажних вагонів під час експлуатаційних досліджень п'ятникових вузлів вимірювалися діаметри [42,68,69]:

- за подовжнім напрямком щодо вагона – діаметр D_x ;
- за поперечним напрямком – діаметр D_y (рис. 2.1).

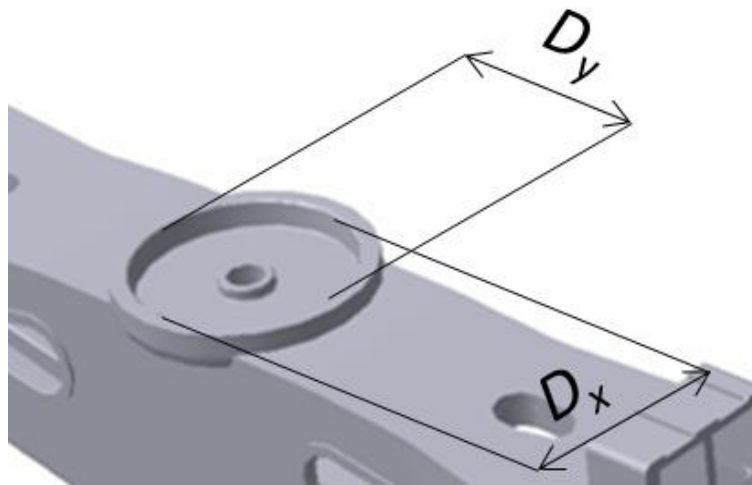


Рисунок 2.1 – Місця виміру діаметрів підп'ятника

Як зазначалось вище, для встановлення характеру зносу підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів будувалась епюра зносу, загальний вигляд якої наведено на рис. 2.2. Вісь OX направлена вздовж перерізу вантажного вагона, а вісь OY – у перпендикулярному напрямку до осі OX .

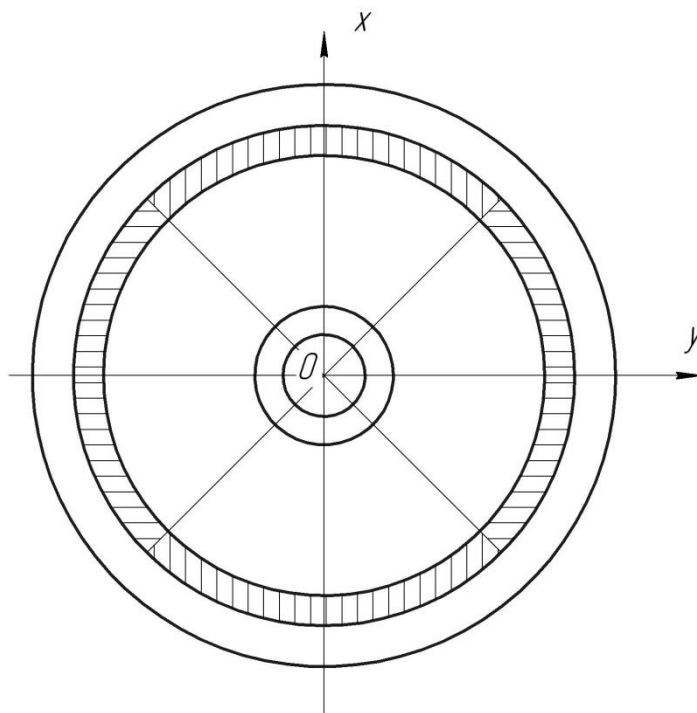


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд епюри середнього зносу підп'ятника вантажного вагона

Відповідно до отриманих епюр середнього зносу підп'ятника вантажного вагона виконали розділення дослідної групи на підгрупи з відповідними характеристиками зносу.

2.2 Результати дослідження

Аналіз експлуатаційного зносу п'ятників і підп'ятників показав, що за подовжнім напрямком щодо вагона (рис. 2.1), діаметри D_x як підп'ятника, так і п'ятника, змінюються інтенсивніше, ніж D_y , тобто в поперечному напрямку вагона (відбувається овалізація). Оскільки $D_x > D_y$, то необхідність ремонту деталей п'ятникових вузлів буде визначатися зносом діаметрів D_x .

Основні результати зносів п'ятникових вузлів та прогностні пробіги дослідних вантажних вагонів [42,68,69] наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Узагальнені дані величин зносів п'ятникових вузлів та
прогнозні пробіги вантажних вагонів

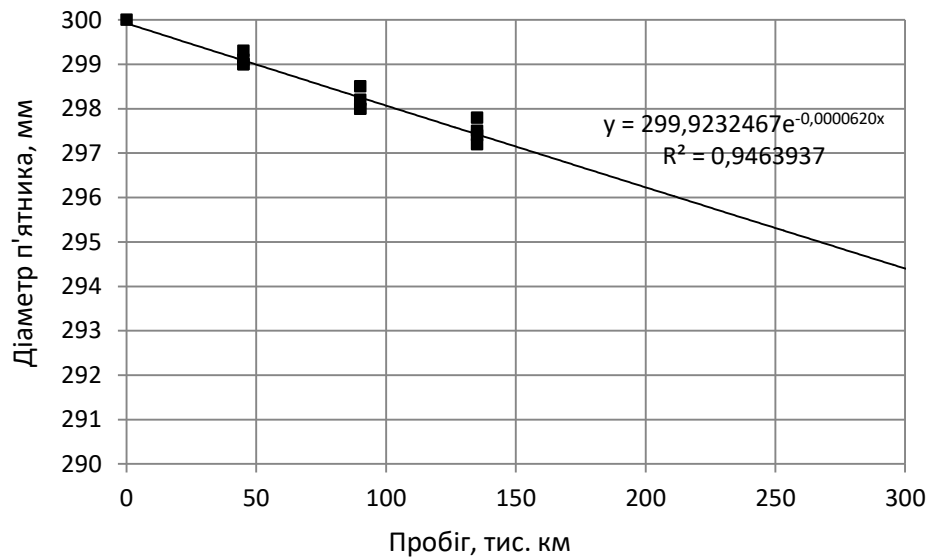
Показник	Середня інтенсивність зносу, мм/10 ⁴ км	Вимірювання після 135 тис. км, мм	Нормативні граничні значення, мм	Прогнозні пробіги, тис. км	
				за статистично максимальним чи мінімальним значенням	за математичним сподіванням
Діаметр підп'ятника	0,308	307,4	308	174	230
Діаметр п'ятника	0,076	297,2	294	320	780

З даних табл. 2.1 випливає, що знос підп'ятника дослідних вантажних вагонів відбувається значно інтенсивніше, ніж знос п'ятників. Це підтверджується й результатами обмірів після пробігу вагонів понад 135 тис. км. Найбільший виміряний діаметр підп'ятника становив 307,4 мм, тобто величина зносу за діаметром дорівнює 7,4 мм, або 2,4 %, тоді як найменший виміряний діаметр п'ятників становить 297,2 мм, тобто знос дорівнює 2,8 мм, або 0,9 %.

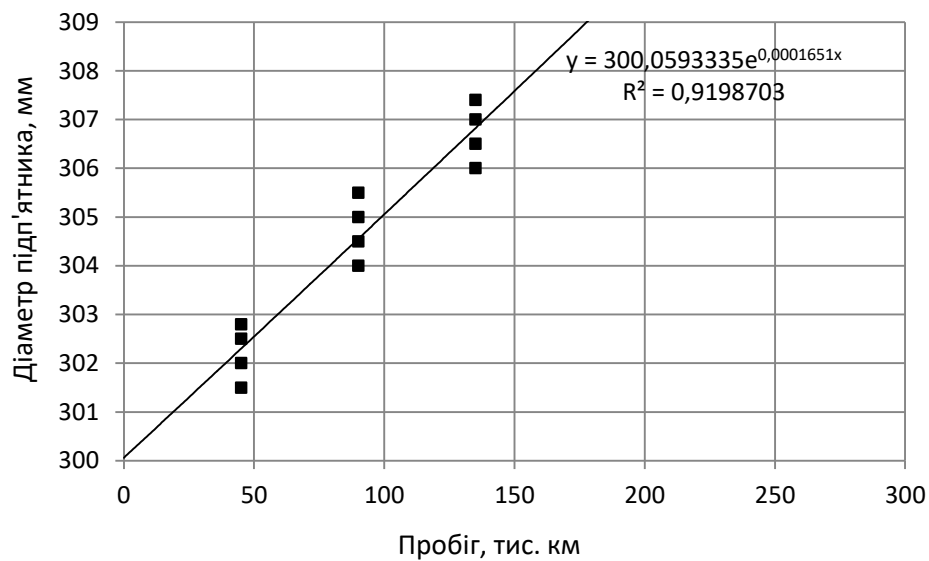
На рис. 2.3 та 2.4 наведено регресійні залежності величин зносу п'ятникового вузла дослідної групи вантажних вагонів від пробігу, побудовані за статистичними даними. На рис. 2.3 показано регресійні лінії у вигляді експоненціальної функції, на рис. 2.4 – у вигляді лінійної залежності.

З отриманих регресійних залежностей величин зносу п'ятникового вузла дослідної групи вантажних вагонів від пробігу можна зробити такі висновки: чим більше у вибірці об'єктів дослідження, тим більш точно отримана модель описує середню величину зносу п'ятників та підп'ятників. Так, для всіх чотирьох наведених залежностей існує сильний кореляційний зв'язок ($r >$

0,7) для окремих вибірок статистичних даних і отриманих регресійних залежностей.

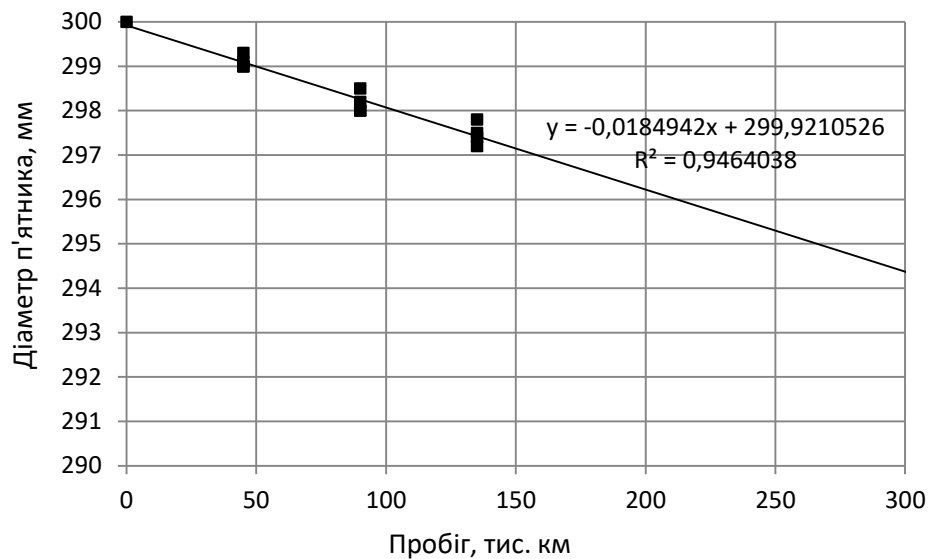


а

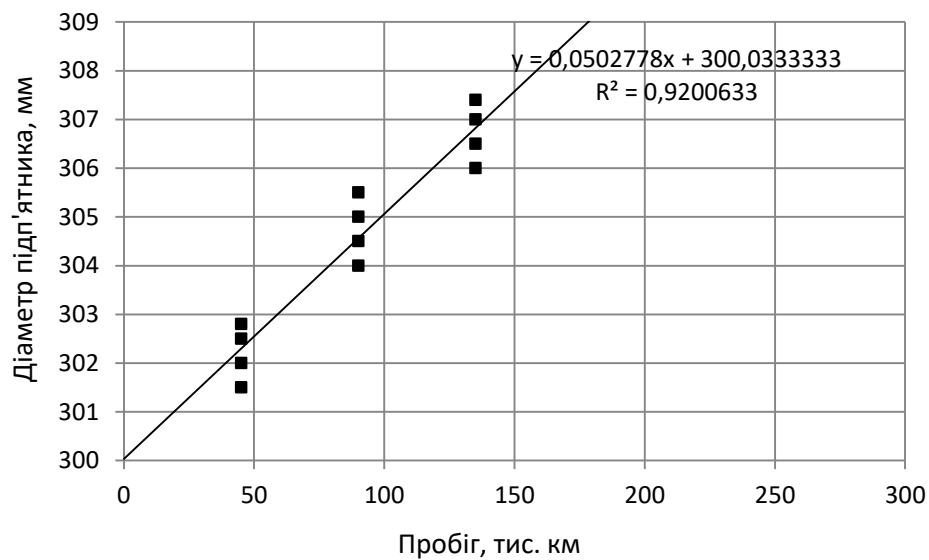


б

Рисунок 2.3 – Регресійні експоненціальні залежності величини зносу п'ятників (а) та підп'ятників (б) від пробігу вантажних вагонів



а



б

Рисунок 2.4 – Регресійні лінійні залежності величини зносу підп'ятників (а) та підп'ятників (б) від пробігу вантажних вагонів

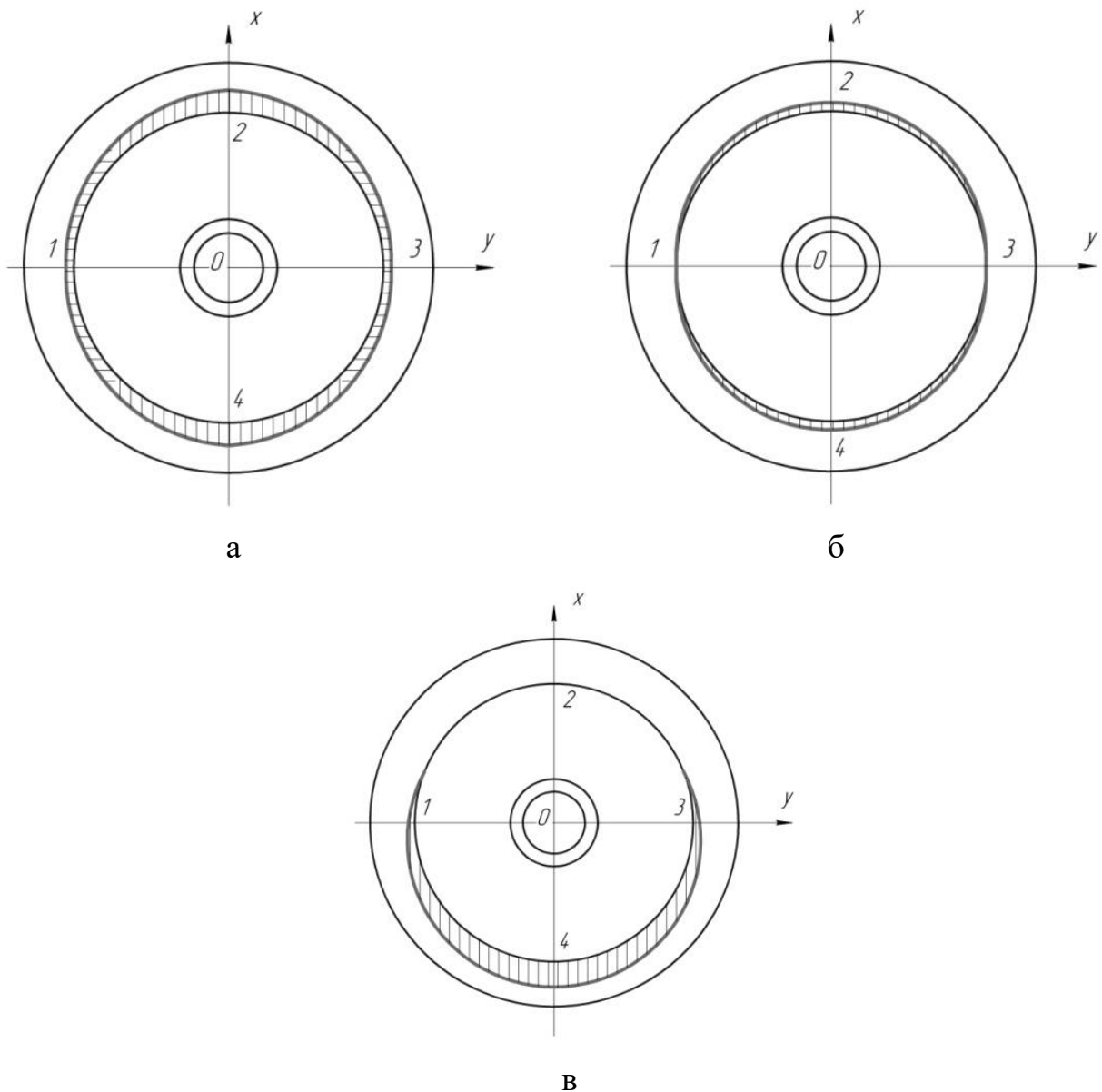
Прогнозні експлуатаційні пробіги дослідної групи вантажних вагонів, що передбачають появу перших ознак граничного зносу, мають такі значення:

- за підп'ятниками – 174 тис. км;
- за п'ятниками – 320 тис. км.

Математичне сподівання граничного значення діаметрів підп'ятників спостерігається за пробігу 230 тис. км, тоді як за діаметром п'ятників – за пробігу 780 тис. км.

Отримані дані дослідження вказують на те, що зносостійкість п'ятників достатня для забезпечення міжремонтного ресурсу вантажних вагонів 300 тис. км, а зносостійкість підп'ятників вантажних вагонів необхідно підвищувати, щоб гарантовано забезпечити ресурс 250...300 тис. км – до першого деповського ремонту.

Дослідження експлуатаційного зносу п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів [35,37] дало змогу побудувати епюри зносу підп'ятників, які були характерні для 95 % випадків у дослідній групі вантажних вагонів, а також розподілити їх на підгрупи за характером зносу відповідно до методики, наведеної в п. 2.1 (рис. 2.5). При цьому 5 вантажних вагонів не потрапили до жодної з підгруп через відсутність описаної закономірності зносу підп'ятників.



а – знос у всіх напрямках; *б* – знос у двох напрямках; *в* – знос одnobічного характеру

Рисунок 2.5 – Епюри зносу підп’ятників надресорних балок візків вантажних вагонів після взаємодії з п’ятником

Рисунок 2.5 демонструє характерний нерівномірний знос підп’ятників надресорних балок візків вантажних вагонів дослідної групи, який призводить до скорочення міжремонтного ресурсу й постановки вагона в передчасний ремонт.

Епюри зносу п’ятників вантажних вагонів не будувались, оскільки їній нерівномірний знос не спостерігався.

2.3 Забезпечення рівномірного зносу п'ятникових вузлів

Результати досліджень експлуатаційного зносу п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів довели, що необхідним є підвищення зносостійкості матеріалу підп'ятників із забезпеченням рівномірного розподілу їхнього зносу під час експлуатації. Після досягнення рівномірного зносу підп'ятників можна буде гарантувати, що міжремонтний пробіг вантажних вагонів досягне 300 тис. км, при цьому не буде здійснюватися передчасна постановка на ремонт і тим самим скоротяться фінансові витрати на утримання вантажних вагонів.

Епюри зносу підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів дослідної групи (див. рис. 2.5) вказують на необхідність застосування матеріалів з дискретними значеннями міцнісних властивостей за діаметром, що буде забезпечувати рівномірний знос. Тобто для підвищення міжремонтного ресурсу підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів під час виготовлення або ремонту необхідно задати дискретну твердість матеріалу за діаметром.

У дисертації пропонується задавати дискретну твердість матеріалу за діаметром, як наведено на рис. 2.6, 2.7. Причому такий розподіл твердості матеріалу підп'ятника за діаметром буде відповідати епюрам зносу, показаним на рис. 2.5.

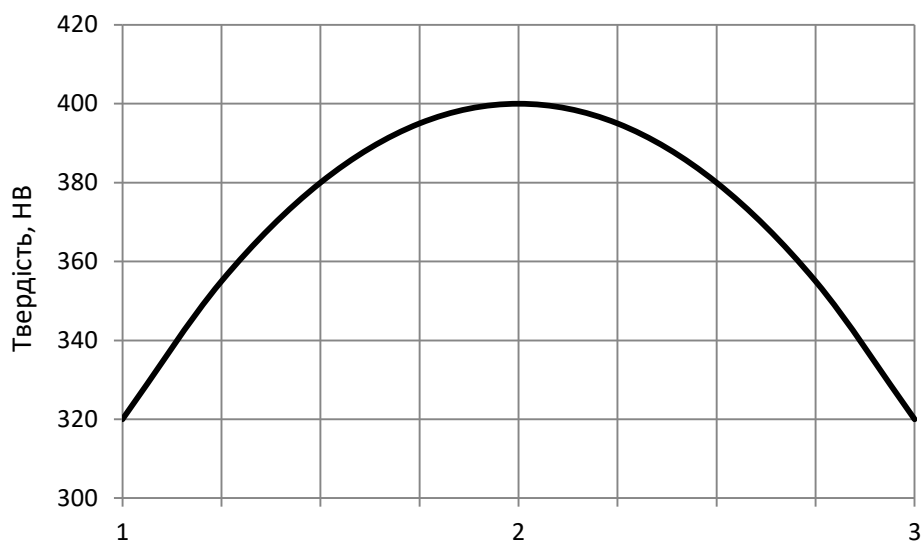


Рисунок 2.6 – Розподіл твердості матеріалу за діаметром підп'ятника надресорної балки візка вантажного вагона, що відповідає епюрам зносу, наведеним на рис. 2.5, а, б

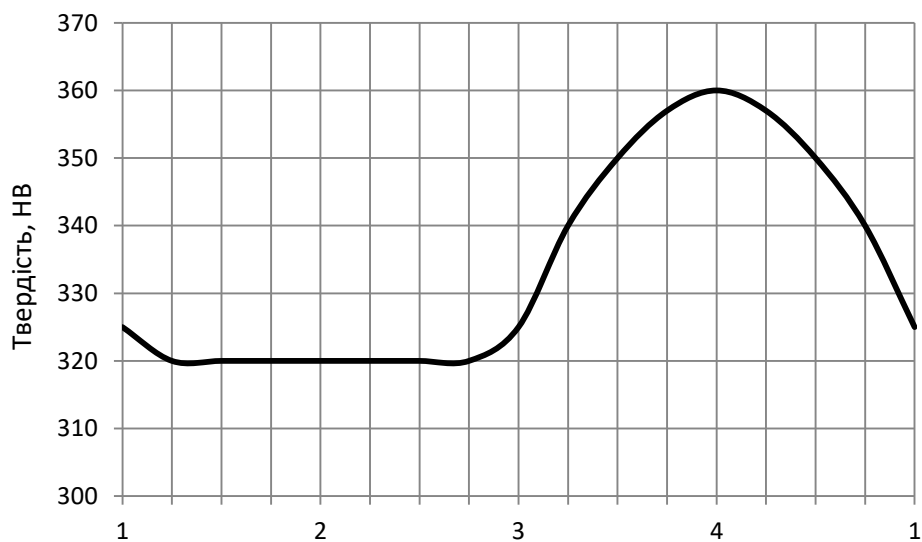


Рисунок 2.7 – Розподіл твердості матеріалу за діаметром підп'ятника надресорної балки візка вантажного вагона, що відповідає епюрі зносу, наведений на рис. 2.5, в

Такий розподіл твердості матеріалу підп'ятника за діаметром можна забезпечити за допомогою існуючих технологій наплавлення та напилювання, але зі значним ускладненням технологічного процесу і збільшенням тривалості самого ремонту. У разі виготовлення підп'ятників з дискретною

твердістю також виникне проблема, що пов'язана з ускладненням технологічного процесу.

Способи наплавлення та напилювання деталей вантажних вагонів належать до групи рідкофазних способів, основним і суттєвим недоліком яких є значний термічний вплив як на матеріал основи, так і на покриття. Крім того, недоліком можна вважати необхідність подальшої механічної обробки для досягнення нормованих розмірів.

Більш перспективними з огляду на це є рідкотвердофазні та твердофазні методи нанесення покриттів, найбільш поширеним з яких є контактне наварювання композиційних матеріалів [35,38]. Наварювати можна найрізноманітніші матеріали – сталю чи порошкову стрічку необхідного складу, сталю чи порошковий дріт, припикати порошкові матеріали. Переваги контактної наварювання полягають у відсутності нагрівання деталей, загартовуванні шарів металу основи та покриття безпосередньо під час наварювання, зменшенні витрат присадного матеріалу в 3...4 рази порівняно з дуговим наплавленням, високій продуктивності, економії електроенергії, відсутності вигорання легувальних елементів, можливості регулювання наварюваного шару в межах 0,1...5,5 мм. Цей спосіб не впливає на стан довкілля і здоров'я оператора [35,38]. Найчастіше його почали використовувати для відновлення та зміцнення деталей типу «вал» [35,38]. Зміцнення контактним наварюванням зносостійких матеріалів на втулки – практично не вивчено.

Ефективним способом збільшення міжремонтного ресурсу деталей вантажних вагонів (підп'ятників) може стати контактне наварювання зносостійких порошкових матеріалів – попередньо сформованих композиційних стрічок.

Особливістю наварювання порошкових стрічок є те, що, нагріваючись по всій товщині шару, через множинність перехідних опорів всередині нього, нагрівається й суміжна ділянка деталі. Залежно від інтервалів температур плавлення різних інгредієнтів композиційного матеріалу в них відбуваються

неоднакові зміни. Частинки тугоплавких матеріалів залишаються незмінними чи подрібнюються, середньоплавких – пластично деформуються і спікаються, легкоплавких – плавляться і заповнюють пори між частинками, які мають більш високу температуру плавлення. Наварений шар практично завжди залишається гетерогенним, складається з тих самих часток, що й вихідний композиційний матеріал [35,38].

Висновки до розділу 2

У результаті досліджень експлуатаційного зносу п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів встановлено, що передчасне відчеплення у ремонт за прогнозом граничного зносу підп'ятника відбувається за пробігу 174 тис. км, тоді як за зносом п'ятника прогнозний міжремонтний ресурс становить 320 тис. км. Тобто ресурсовизначальним елементом вантажного вагона є підп'ятник, який має недостатній міжремонтний ресурс, і для досягнення величини міжремонтного пробігу 300 тис. км необхідно підвищувати його зносостійкість.

Побудовано епюри зносу підп'ятників надресорних балок візків дослідної групи вантажних вагонів, для яких характерний нерівномірний розподіл за діаметром, що, зі свого боку, призводить до скорочення міжремонтного ресурсу й передчасної постановки вагона в ремонт. Знос п'ятників вантажних вагонів мав характер рівномірного розподілу за діаметром.

На основі побудованих епюр зносу підп'ятників запропоновано розподіляти твердість матеріалу за діаметром для забезпечення рівномірного зносу в експлуатації що, відповідно, збільшить міжремонтний ресурс вантажних вагонів. Для цього рекомендується використовувати композиційні стрічки з дискретною твердістю за довжиною (та/або шириною) та

технологічний процес – контактне наварювання попередньо сформованих композиційних стрічок.

Запропоновані заходи дадуть можливість збільшити міжремонтний пробіг і зменшити фінансові витрати на утримання та ремонт вантажних вагонів.

РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ МІЖРЕМОНТНОГО РЕСУРСУ П'ЯТНИКОВОГО ВУЗЛА ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

3.1 Модель геометрії зносу підп'ятника

Для встановлення меж розподілу відновлюваного матеріалу на діаметрі підп'ятника необхідно розглянути втомний процес його зносу під час взаємодії з п'ятником і описати геометрію поверхні зносу підп'ятника.

Розглянемо зміну форми перерізу підп'ятника з позиції математики, врахувавши напружено-деформований стан робочої поверхні [48]. Для цього спрямуємо вісь OX вздовж вантажного вагона, а OY і OZ – у взаємно перпендикулярних напрямках перерізу вагона (рис. 3.1).

Тоді координати точок поверхні підп'ятника відповідно до рис. 3.1 визначимо за такими виразами:

$$x = f(y, z, c_1) \pm \sqrt{B(y, z, c_1)}; \quad (3.1)$$

$$y = f(x, z, c_2) \pm \sqrt{B(x, z, c_2)}; \quad (3.2)$$

$$z = f(x, y, c_3) \pm \sqrt{B(x, y, c_3)}, \quad (3.3)$$

де $f(y, z, c_1)$, $f(x, z, c_2)$, $f(x, y, c_3)$ – функції, які характеризують деформацію стиску в перерізах XOY , XOZ , YOZ підп'ятника в процесі експлуатації;

c_1, c_2, c_3 – константи форми поверхні;

$\pm \sqrt{B(y, z, c_1)}$, $\pm \sqrt{B(x, z, c_2)}$, $\pm \sqrt{B(x, y, c_3)}$ – девіаторні частини тензора деформацій, що відповідають за поверхневу зміну підп'ятника; під коренем

розміщені функції переміщення точок п'ятника відносно підп'ятника у відповідних напрямках руху.

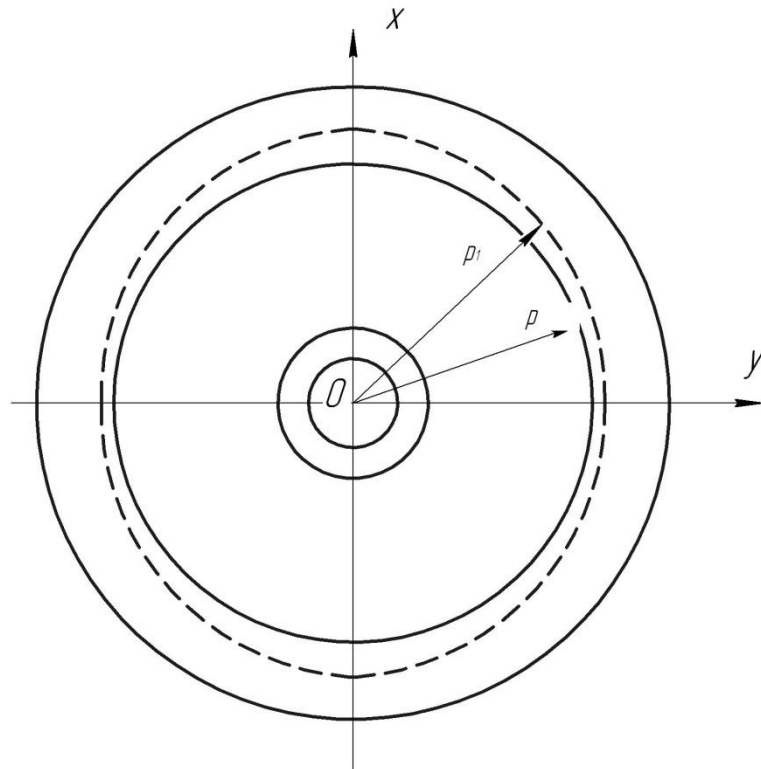


Рисунок 3.1 – Зміна форми підп'ятника

Варо наголосити на відсутності фактора часу в рівняннях (3.1)–(3.3), тобто за допомогою цих рівнянь можна описати траєкторію руху точок поверхні підп'ятника. Для визначення зміщення точок з опорної поверхні на зношену поверхню необхідно розкласти наведені рівняння в ряд Тейлора й обмежитися похідними першого порядку, оскільки вищий порядок не буде суттєво впливати на напружено-деформований стан підп'ятника.

Деформацію матеріалу підп'ятника у відповідній точці можна визначити подовженням або стискуванням лінійного навантаженого елемента поверхні, що проходить через цю точку. Координати такого навантаженого елемента відносно відповідної точки будуть дорівнювати [48]:

$$dx = \rho l; \quad dy = \rho m; \quad dz = \rho n, \quad (3.4)$$

де ρ – радіус навантаженого елемента;

l, m, n – напрямні косинуси, що відбивають умови навантаження тертям.

Визначити зміщення u_x, u_y, u_z навантаженого елемента в процесі руху вздовж осей OX, OY, OZ під час деформації можна на основі таких виразів:

$$u_x = \frac{\partial A}{\partial y} dy + \frac{\partial A}{\partial z} dz + \frac{\int f(y, z)}{\sqrt{f(y, z, c_1)}} = \frac{\partial A}{\partial y} \rho m + \frac{\partial A}{\partial z} \rho n + \frac{\int f(y, z)}{\sqrt{f(y, z, c_1)}}; \quad (3.5)$$

$$u_y = \frac{\partial A}{\partial x} dx + \frac{\partial A}{\partial z} dz + \frac{\int f(x, z)}{\sqrt{f(x, z, c_2)}} = \frac{\partial A}{\partial x} \rho l + \frac{\partial A}{\partial z} \rho n + \frac{\int f(x, z)}{\sqrt{f(x, z, c_2)}}; \quad (3.6)$$

$$u_z = \frac{\partial A}{\partial x} dx + \frac{\partial A}{\partial y} dy + \frac{\int f(x, y)}{\sqrt{f(x, y, c_3)}} = \frac{\partial A}{\partial x} \rho l + \frac{\partial A}{\partial y} \rho m + \frac{\int f(x, y)}{\sqrt{f(x, y, c_3)}}. \quad (3.7)$$

У процесі тертя та зношування радіус навантаженого елемента підп'ятника буде змінюватися відповідно до виразу

$$\begin{aligned} \rho_1 = \rho & \left(1 + l^2 \frac{\partial u_x}{\partial x} + m^2 \frac{\partial u_y}{\partial y} + n^2 \frac{\partial u_z}{\partial z} + lm \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + \right. \\ & \left. + nl \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) + mn \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Відносна деформація навантаженого елемента підп'ятника в умовах тертя для відповідних осей становить [48]:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = \varepsilon_{xx}; \quad \frac{\partial u_y}{\partial y} = \varepsilon_{yy}; \quad \frac{\partial u_z}{\partial z} = \varepsilon_{zz}; \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} = \varepsilon_{xy}; \quad \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} = \varepsilon_{xz}; \quad \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} = \varepsilon_{yz}. \quad (3.10)$$

Відповідно до закону Гука [48,50], тензори деформацій і напружень можна подати для загального випадку в такому вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \lambda\Theta + 2\mu\varepsilon_x; \\ \sigma_y = \lambda\Theta + 2\mu\varepsilon_y; \\ \sigma_z = \lambda\Theta + 2\mu\varepsilon_z; \\ \tau_{yz} = \mu\gamma_{yz}; \\ \tau_{zx} = \mu\gamma_{zx}; \\ \tau_{xy} = \mu\gamma_{xy}, \end{array} \right. \quad (3.11)$$

де σ_x , σ_y , σ_z – нормальні напруження навантаженого елемента підп'ятника вздовж осей координат;

λ , μ – пружні сталі Ламе навантаженого елемента підп'ятника;

$$\Theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z};$$

τ_{xy} , τ_{zx} , τ_{yz} – дотичні напруження;

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}, \quad \gamma_{yx} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}.$$

Якщо останню систему рівнянь (3.11) підставити у рівняння рівноваги, то отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + x = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + y = 0. \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + z = 0 \end{array} \right. \quad (3.12)$$

Після перетворень і спрощень система рівнянь (3.12) набуде такого вигляду:

$$\begin{cases} (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) + \mu \nabla^2 u_x + x = 0 \\ (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial \Theta}{\partial y} \right) + \mu \nabla^2 u_y + y = 0, \\ (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) + \mu \nabla^2 u_z + z = 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

де $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа.

Розв'язуючи систему диференціальних рівнянь (3.13) для відповідних початкових умов з урахуванням опорного стану підп'ятника, можна визначити значення зміщень u_x , u_y , u_z з використанням виразів (3.5)–(3.7), а потім знайти геометрію поверхні підп'ятника (вирази (3.1)–(3.3)) на відповідному життєвому циклі вантажного вагона.

Використовуючи рівняння (3.8) для заданої силової взаємодії п'ятника з підп'ятником, побудуємо вихідну геометрію поверхні підп'ятника піввагона моделі 12-7023, яку наведемо на рис. 3.2.

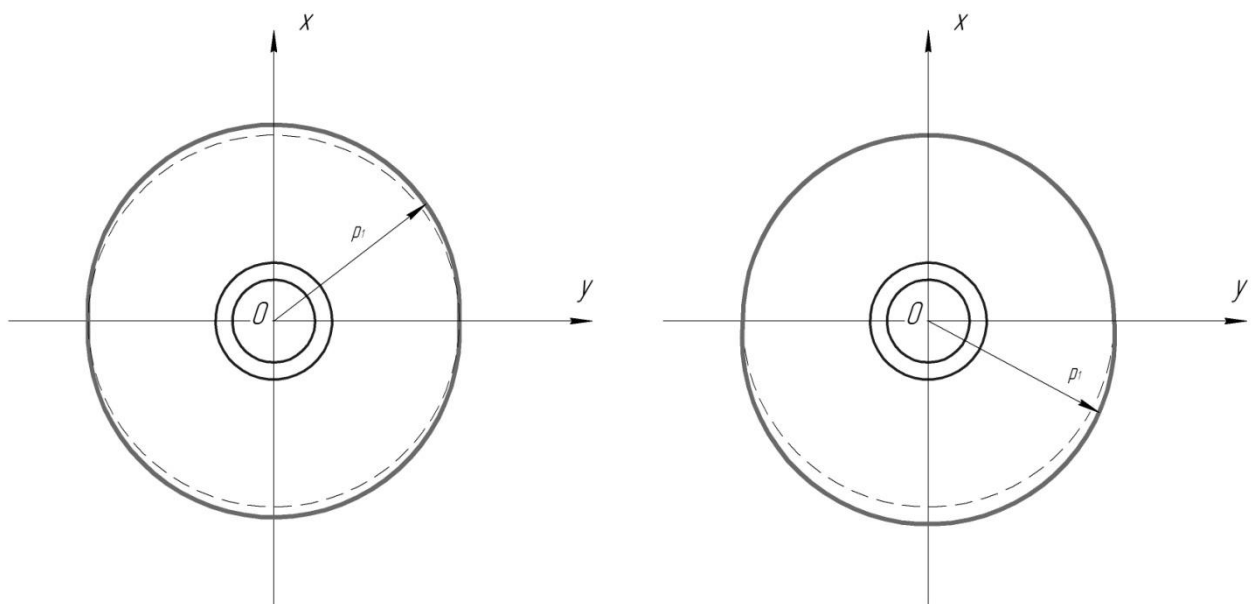


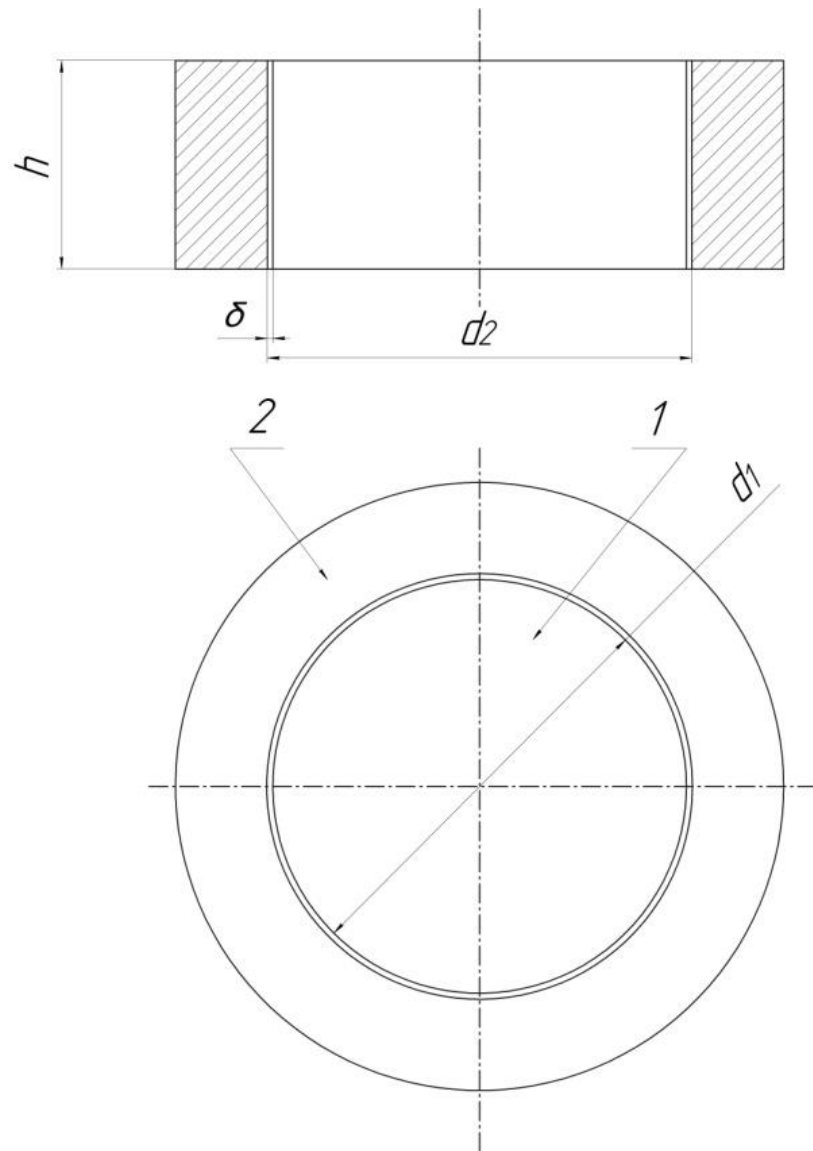
Рисунок 3.2 – Вихідна геометрія поверхні підп'ятника під час взаємодії з п'ятником піввагона моделі 12-7023

Наведена геометрія поверхні підп'ятника під час взаємодії з п'ятником (див. рис. 3.2) показує практично близькі контури, що отримані в ході аналізу стану зносу п'ятникових вузлів, наведених у вигляді епюр зносу підп'ятників на рис. 2.5, б, в.

3.2 Взаємодія циліндричних поверхонь пари тертя «п'ятник – підп'ятник»

Взаємодію циліндричних поверхонь пари тертя «п'ятник – підп'ятник» вантажного вагона розглянемо у вигляді моделі «вал – втулка». Для виведення виразів зносу будемо використовувати теоретичні положення Б. І. Костецького [115,116].

Розглянемо модель «вал – втулка» у вигляді спрощеної схеми взаємодії пари тертя «п'ятник – підп'ятник», що наведена на рис. 3.3. Як бачимо, у ненавантаженому стані між п'ятником та підп'ятником існує зазор δ . Але в процесі експлуатації цей зазор буде змінюватись по твірній залежно від навантаження. Тобто взаємодія циліндричних поверхонь пари тертя «п'ятник – підп'ятник» відбувається на деякій контактній площі з виникненням відповідного контактного тиску між елементами.



1 – вал; 2 – втулка

Рисунок 3.3 – Спрощена схема взаємодії пари тертя «п’ятник – підп’ятник»

Далі для визначення контактного тиску та величин зносу на рис. 3.4 наведемо спрощену розрахункову схему взаємодії пари тертя «п’ятник – підп’ятник» для випадку, коли п’ятник діє на підп’ятник з силою Q .

Площа контакту елементарної площадки в цьому випадку буде визначатися такою формулою:

$$dS = \frac{hd_1}{2} d\alpha, \quad (3.14)$$

де $d\alpha$ – кут сегмента, що визначає площу контакту елементарної площадки;

h – висота взаємодії циліндричних поверхонь пари тертя «п'ятник – підп'ятник».

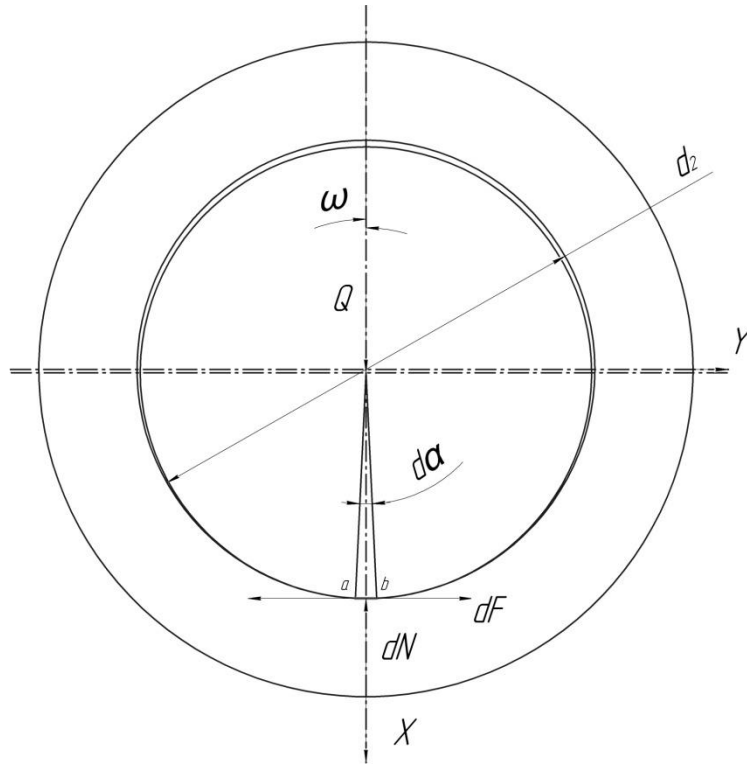


Рисунок 3.4 – Розрахункова схема взаємодії пари тертя «п'ятник – підп'ятник»

Силу нормального тиску на елементарну площадку за умови дії на підп'ятник навантаження Q можна обчислити за виразом

$$dN = p \frac{hd_1}{2} d\alpha, \quad (3.15)$$

де p – величина контактного тиску в елементарній площадці.

Тоді в разі взаємодії контактний тиск на елементарній площадці буде дорівнювати:

$$p = \frac{2}{hd_2} \frac{dN}{d\alpha}. \quad (3.16)$$

На елементарній площадці буде виникати сила тертя, яка пропорційна нормальному тиску:

$$dF = fp \frac{hd_2}{2} d\alpha. \quad (3.17)$$

З останнього виразу контактний тиск на елементарній площадці буде дорівнювати

$$p = \frac{2}{fhd_2} \frac{dF}{d\alpha}, \quad (3.18)$$

де f – коефіцієнт тертя між поверхнями п'ятника та підп'ятника.

Постійний знос на елементарній площадці ab у зворотному напрямку дії сили тертя dF позначимо через δ_F , а змінний знос, що діє в напрямку сили Q , позначимо як δ_N .

Для вказаних величин зносу, що діють в елементарній площадці, запишемо співвідношення у такому вигляді:

$$\delta_F = \delta_N \cos \alpha. \quad (3.19)$$

Оскільки радіальний знос δ_N повинен бути пропорційним питомому тиску та відносній знакозмінній швидкості ковзання в контактні пари тертя «п'ятник – підп'ятник», то можна записати такий вираз:

$$\delta_N = kp\omega \frac{d_2}{2}, \quad (3.20)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, який залежить від властивостей матеріалів, що взаємодіють;

ω – колова знакозмінна швидкість обертання підп'ятника навколо п'ятника в експлуатації під час руху.

Тоді величина постійного зносу елементарної площадки δ_F буде мати таке співвідношення:

$$\delta_F = k\rho\omega\frac{d_2}{2}\cos\alpha. \quad (3.21)$$

Оскільки коефіцієнт пропорційності k залежить від властивостей матеріалів п'ятника та підп'ятника, а також положення площі контактної взаємодії, то в цьому випадку приймемо таке співвідношення:

$$k = f \frac{K_2^2 HB_1 L}{K_1 HB_2 v} \cos\varphi, \quad (3.22)$$

де K_1, K_2 – пружні сталі для матеріалу п'ятника та підп'ятника відповідно, які визначаються за виразами (3.23);

HB_1, HB_2 – твердості (або мікротвердості) матеріалів п'ятника та підп'ятника відповідно;

L – шлях руху вагона у складі поїзда;

v – швидкість руху вагона у складі поїзда;

φ – кут між прикладеним зусиллям та контактною взаємодією сполучених елементів, $0 \leq \varphi < \pi/2$.

$$K_1 = \frac{1-\mu_1^2}{E_1}; \quad K_2 = \frac{1-\mu_2^2}{E_2}, \quad (3.23)$$

μ_1, μ_2 – коефіцієнти Пуассона для матеріалу п'ятника та підп'ятника відповідно;

E_1, E_2 – модулі пружності матеріалу п'ятника та підп'ятника відповідно.

У виразі (3.21) урахуємо останні викладки з урахуванням інтегрування виразу (3.16) Тоді для величини постійного зносу підп'ятника δ_F маємо таке співвідношення:

$$\delta_F = f \frac{E_1(1 - \mu_2^2)^2 HB_1}{E_2^2(1 - \mu_1^2) HB_2} \frac{\omega d_2}{hd_1} \frac{Q}{\alpha} \frac{L}{v} \cos \alpha \cos \varphi. \quad (3.24)$$

Для реального контакту у взаємодії п'ятника та підп'ятника, не знижуючи достовірність розрахунків, можна прийняти значення α , що не перевищує декількох градусів, тоді $\cos \alpha \cong 1$.

У результаті вираз для величини зносу підп'ятника набуде такого вигляду:

$$\delta_F = f \frac{E_1(1 - \mu_2^2)^2 HB_1}{E_2^2(1 - \mu_1^2) HB_2} \frac{\omega d_2}{hd_1} \frac{Q}{\alpha} \frac{L}{v} \cos \varphi. \quad (3.25)$$

Якщо за взаємодії циліндричних поверхонь п'ятника та підп'ятника врахувати всі сумарні сили, що діють у горизонтальній площині (у поперечному й поздовжньому напрямках), як наведено на рис. 3.5, тобто за умов повороту візка під час подолання кривої, то отримаємо сумарну силу контактної взаємодії ΣP :

$$\Sigma P = \Sigma Q \cos \varphi + \Sigma N \sin \varphi,$$

а точка дотику переміститься на кут φ .

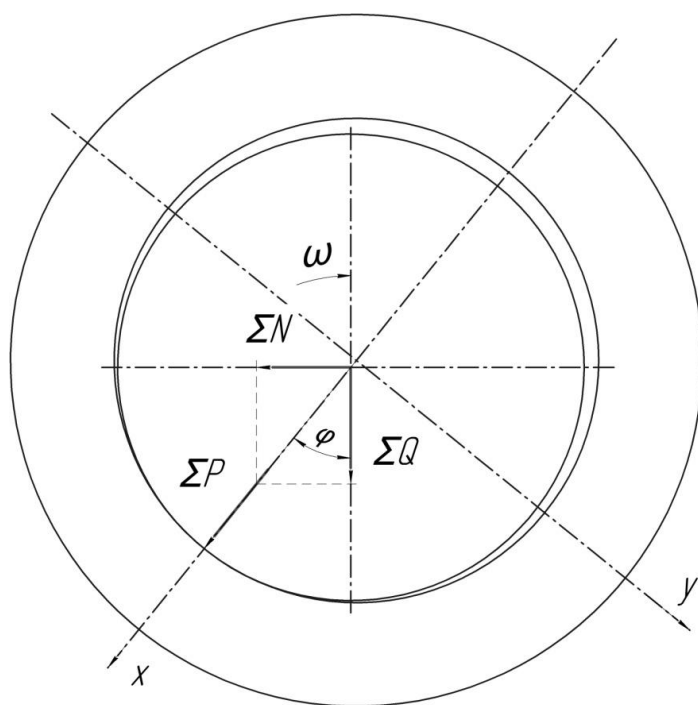


Рисунок 3.5 – Взаємодія циліндричних поверхонь п'ятника та підп'ятника за умови врахування всіх сумарних сил, що діють в горизонтальній площині (у поперечному й поздовжньому напрямках)

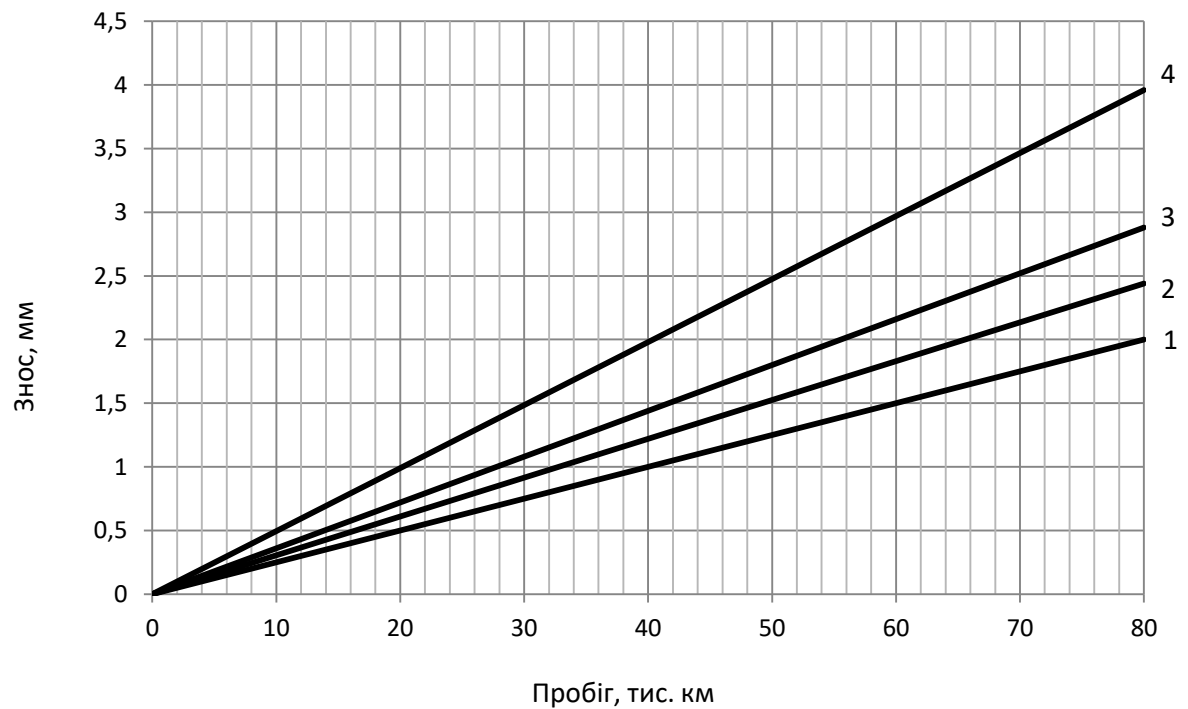
Тоді вираз (3.25) для величини зносу циліндричної поверхні підп'ятника буде мати більш точне значення (для руху в кривих), оскільки буде враховувати всі сили, що діють у горизонтальній площині, зокрема бокові, рамні та інерційні:

$$\delta_{FN} = f \frac{E_1(1 - \mu_2^2)^2 H B_1}{E_2^2(1 - \mu_1^2) H B_2} \frac{\omega d_2}{h d_1 \alpha v} L (\Sigma Q \cos \varphi + \Sigma N \sin \varphi). \quad (3.26)$$

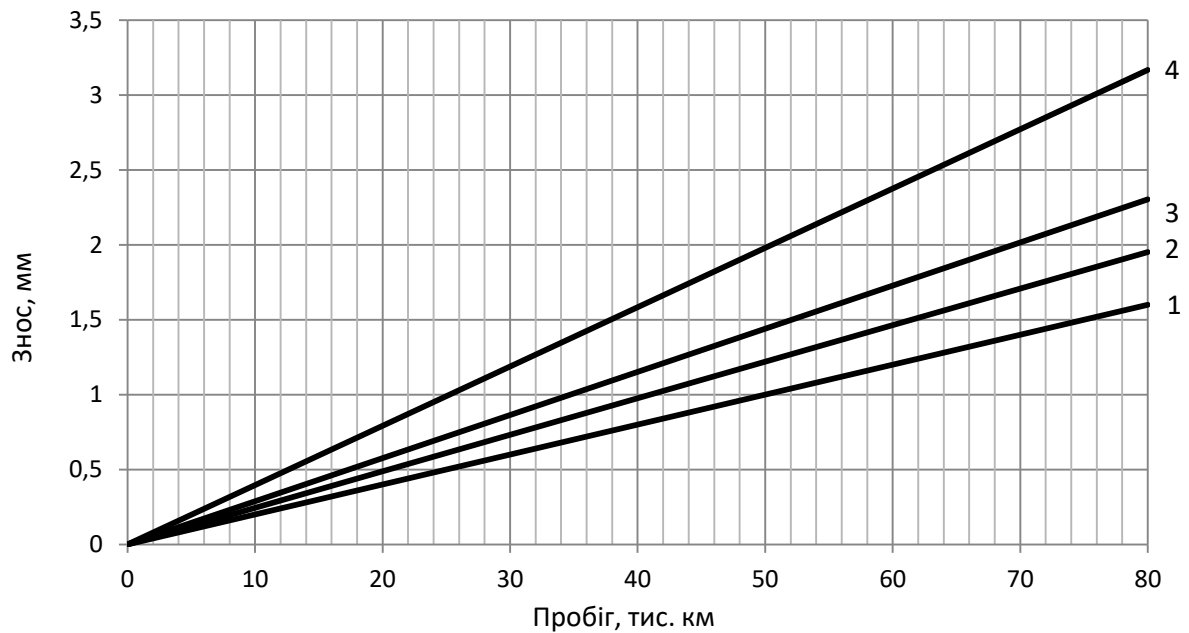
На основі отриманого виразу (3.26) побудуємо залежності середньої величини зносу підп'ятника для піввагона моделі 12-7023, який рухається у складі поїзда зі швидкістю 80 км/год (рис. 3.6, а) і 100 км/год (рис. 3.6, б) для випадків різних значень коефіцієнта використання пробігу.

З рис. 3.6 спостерігається лінійна залежність середньої величини зносу підп'ятника від пробігу вагона на прикладі піввагона моделі 12-7023. Крім того, з підвищенням швидкості руху поїзда до 100 км/год середня величина

зносу підп'ятника піввагона моделі 12-7023 нижче на 25 %, ніж за швидкості 80 км/год.



a



б

Рисунок 3.6 – Залежність середньої величини зносу підп'ятника піввагона моделі 12-7023, який рухається у складі поїзда зі швидкістю 80 км/год (а) і 100 км/год (б) для значень коефіцієнта використання пробігу: 1 – 0,5; 2 – 0,6; 3 – 0,7; 4 – 1,0

3.3 Визначення зазору в сполученні «п'ятник – підп'ятник»

Зазор у парі тертя «п'ятник – підп'ятник» у момент прикладання зусилля тяги Q , що збігається з віссю OX вантажного вагона, знайдемо на основі схеми, наведеної на рис. 3.7.

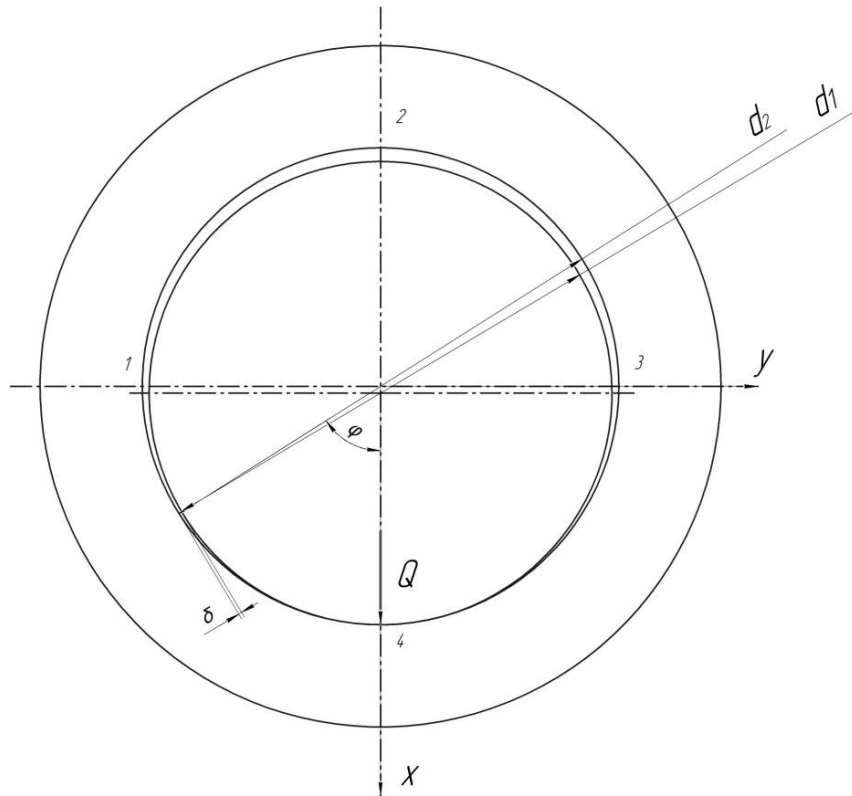


Рисунок 3.7 – Схема взаємодії циліндричних поверхонь п'ятникового вузла в момент прикладання зусилля тяги

Відповідно до схеми, наведеної на рис. 3.7, зазор у парі тертя «п'ятник – підп'ятник» буде дорівнювати

$$\delta = \frac{1}{2} \left(d_2 - (d_2 - d_1) \cos \varphi - \left(d_1^2 - ((d_2 - d_1) \sin \varphi)^2 \right)^{0,5} \right),$$

$$0 \leq \varphi \leq \pi. \quad (3.27)$$

Кут φ на рис. 3.7 і у виразі (3.27) буде визначальним для визначення зазору в лівій частині (III і IV чверті) пари тертя «п'ятник – підп'ятник». Зазор

у правій частині (І і ІІ чверті) п'ятникового вузла буде ідентичним зазору лівої частини.

Так, у точках 1 і 3 зазор у парі тертя «п'ятник – підп'ятник» буде становити

$$\delta_{1,3} = \frac{1}{2}(d_2 - (2d_1d_2 - d_2^2)^{0,5});$$

у точці 2:

$$\delta_2 = d_2 - d_1;$$

у точці 4:

$$\delta_4 = 0.$$

У випадку знакозмінного навантаження на точки 2 і 4, та 1 і 3 (рис. 3.7) у процесі експлуатації (під час розгону та гальмування поїзда) величина зазору циліндричних поверхонь у парі тертя «п'ятник – підп'ятник» буде змінюватися з урахуванням зміни величини зносу, тобто:

$$\delta_{\Sigma} = \delta + \delta_{FN}, \quad (3.28)$$

або в загальному вигляді для випадку рівномірного зносу циліндричних поверхонь

$$\delta_{\Sigma} = \frac{1}{2}(d_2 + 2\delta_F - (d_2 + 2\delta_F - d_1)\cos\varphi - (d_1^2 - ((d_2 + 2\delta_F - d_1)\sin\varphi)^2)^{0,5}), \quad 0 \leq \varphi \leq \pi. \quad (3.29)$$

Тоді за виразом (3.29) сумарний зазор у точках 1 і 3 у парі тертя «п'ятник – підп'ятник» буде дорівнювати

$$\delta_{\Sigma 1,3} = \frac{1}{2}(d_2 + 2\delta_F) + ((2\delta_F + d_2)(2d_1 - d_2 - 2\delta_F))^{0,5};$$

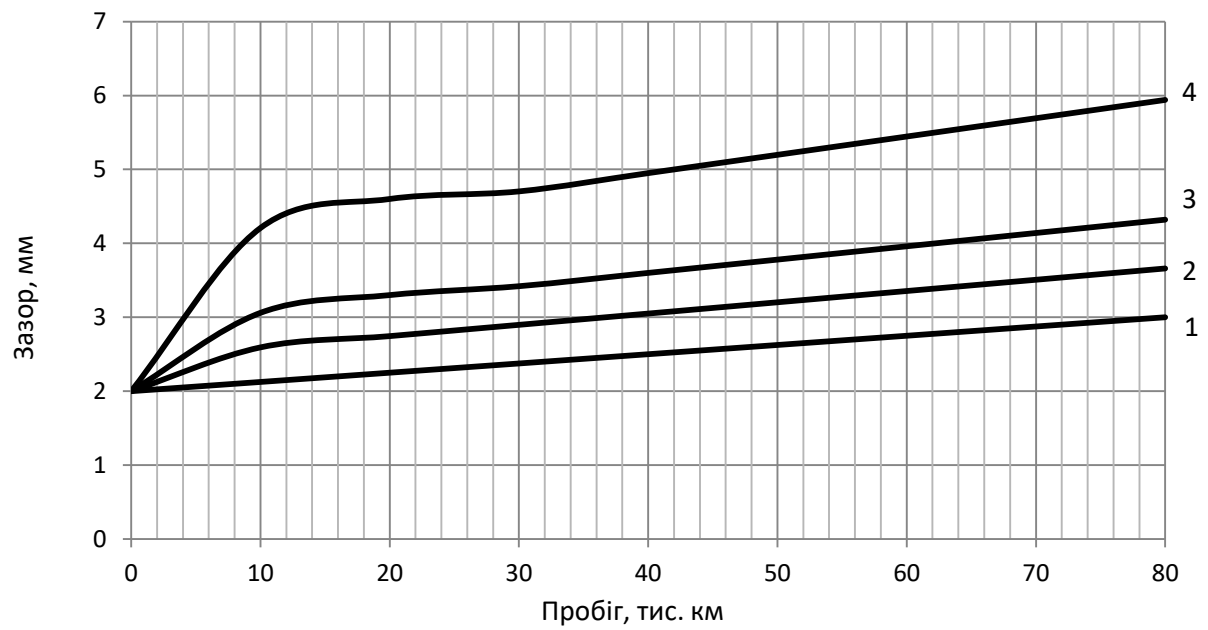
у точці 2 (та у точці 4 – у разі симетричного прикладання зусилля, наприклад у процесі зтяжного гальмування):

$$\delta_{\Sigma 2(4)} = d_2 - d_1 + 2\delta_F.$$

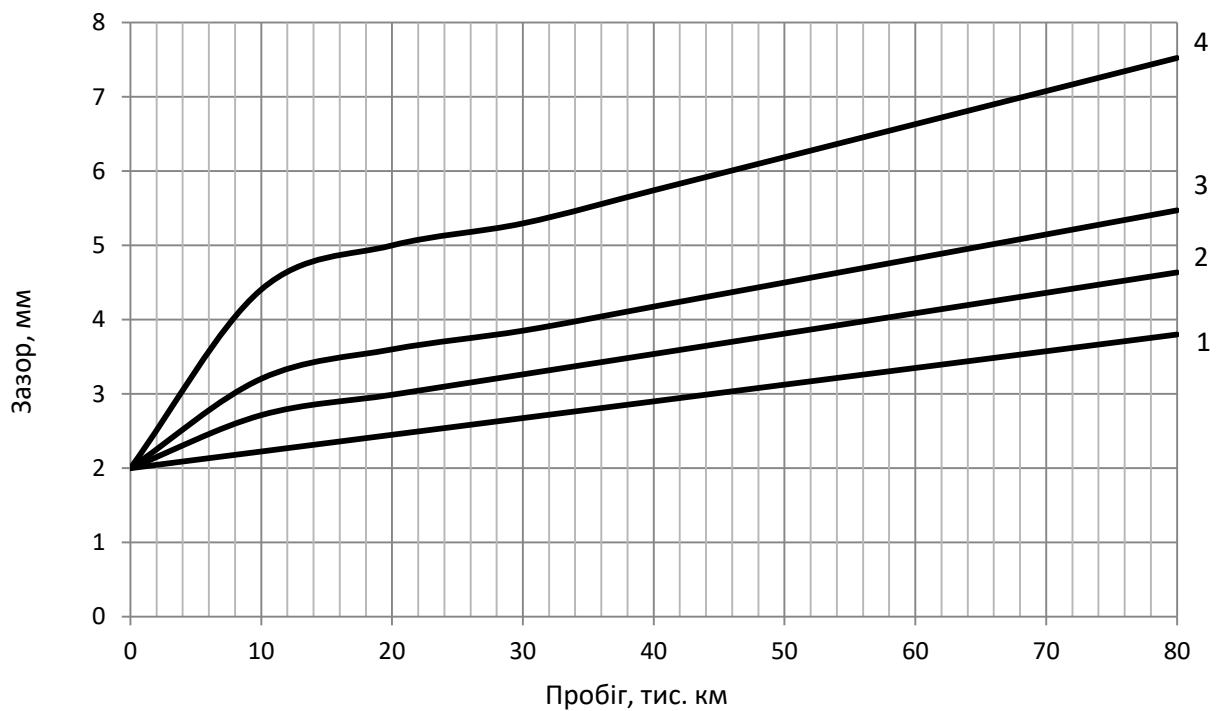
Якщо попередньо відомий або вимірний зазор між циліндричними поверхнями пари «п'ятник – підп'ятник», то зміна величини зазору в процесі експлуатації вагона становитиме:

$$\begin{aligned} \delta_{\Sigma} = & \frac{1}{2} \left(d_2 - (d_2 - d_1) \cos \varphi - \left(d_1^2 - ((d_2 - d_1) \sin \varphi)^2 \right)^{0,5} \right) + \\ & + f \frac{E_1(1 - \mu_2^2)^2 H B_1}{E_2^2(1 - \mu_1^2) H B_2} \frac{\omega d_2}{h d_1 \alpha v} \frac{L}{v} (\Sigma Q \cos \varphi + \Sigma N \sin \varphi), \\ & 0 \leq \varphi \leq \pi. \end{aligned} \quad (3.30)$$

На основі виразу (3.30) побудуємо залежності зазору між циліндричними поверхнями п'ятника та підп'ятника δ_{Σ} піввагона моделі 12-7023 для точок 1 та 2 (точки 3, 4 будуть симетричними) від пробігу за умови, що початковий (вимірний) рівномірний зазор між поверхнями становить 2 мм. Результати моделювання для швидкості руху поїзда 90 км/год наведені на рис. 3.8.



a



б

Рисунок 3.8 – Залежності зазору між циліндричними поверхнями п'ятника та підп'ятника піввагона моделі 12-7023 для точок 1 (*a*) та 2 (*б*) від пробігу за швидкості руху поїзда 90 км/год та коефіцієнта використання пробігу: 1 – 0,5; 2 – 0,6; 3 – 0,7; 4 – 1,0

Як бачимо з рис. 3.8, спостерігається нерівномірний зазор у точках 1 та 2 (3 та 4). При цьому різниця зазорів, залежно від пробігу, становить 0,1...1,6 мм, а величина зазору в точці 2 (4) у 1,05...1,27 раза вище порівняно з точкою 1 (3). Також варто зауважити про нелінійність зазорів між циліндричними поверхнями пари «п'ятник – підп'ятник» до 20 тис. км пробігу, а понад цей пробіг відбувається вирівнювання й спостерігається лінійна залежність.

Наведені залежності підтверджують необхідність застосування матеріалів з дискретною зносостійкістю за твірною циліндричної поверхні підп'ятника. Далі розглянемо теоретичні викладки щодо застосування матеріалів з дискретною міцністю та зносостійкістю.

3.4 Застосування матеріалів з дискретною міцністю та зносостійкістю для ремонту підп'ятників

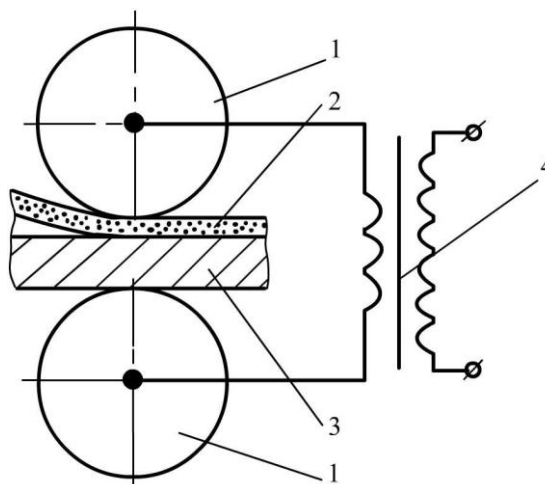
Під час ремонту підп'ятника надресорної балки з метою підвищення міжремонтного ресурсу та забезпечення рівномірного зносу за циліндричною поверхнею у разі взаємодії з п'ятником, як згадувалося у попередньому розділі, можна застосувати композиційну стрічку.

Відомо [12,72], що композиційні стрічки мають досить складну будову й складаються з металевої оболонки, виготовленої з холоднокатаної стрічки відповідного розміру, що заповнена порошковим матеріалом певного складу.

Композиційні стрічки порівняно з порошковими матеріалами за певних умов мають значні переваги, такі як: пластичність; відсутність потреби у підготовчих діях перед вживанням; можливість використання за різних технологічних методів нанесення покриттів. З негативних властивостей необхідно виокремити металеву оболонку, яка в певному ракурсі нівелює можливість у точному проектуванні складу, що впливає на властивості композиційного покриття. Такий недолік відсутній у спечених композиційних стрічках, що отримані за допомогою методів порошкової металургії за

холодного прокочування суміші матричних матеріалів і плакованих керамічних порошків із спіканням під захистом у середовищі інертного газу.

Для нанесення композиційних стрічок у ході зміцнення та ремонту елементів деталей машин застосовують різні способи. Найбільш поширеним з них є контактне наварювання [53] (рис. 3.9).



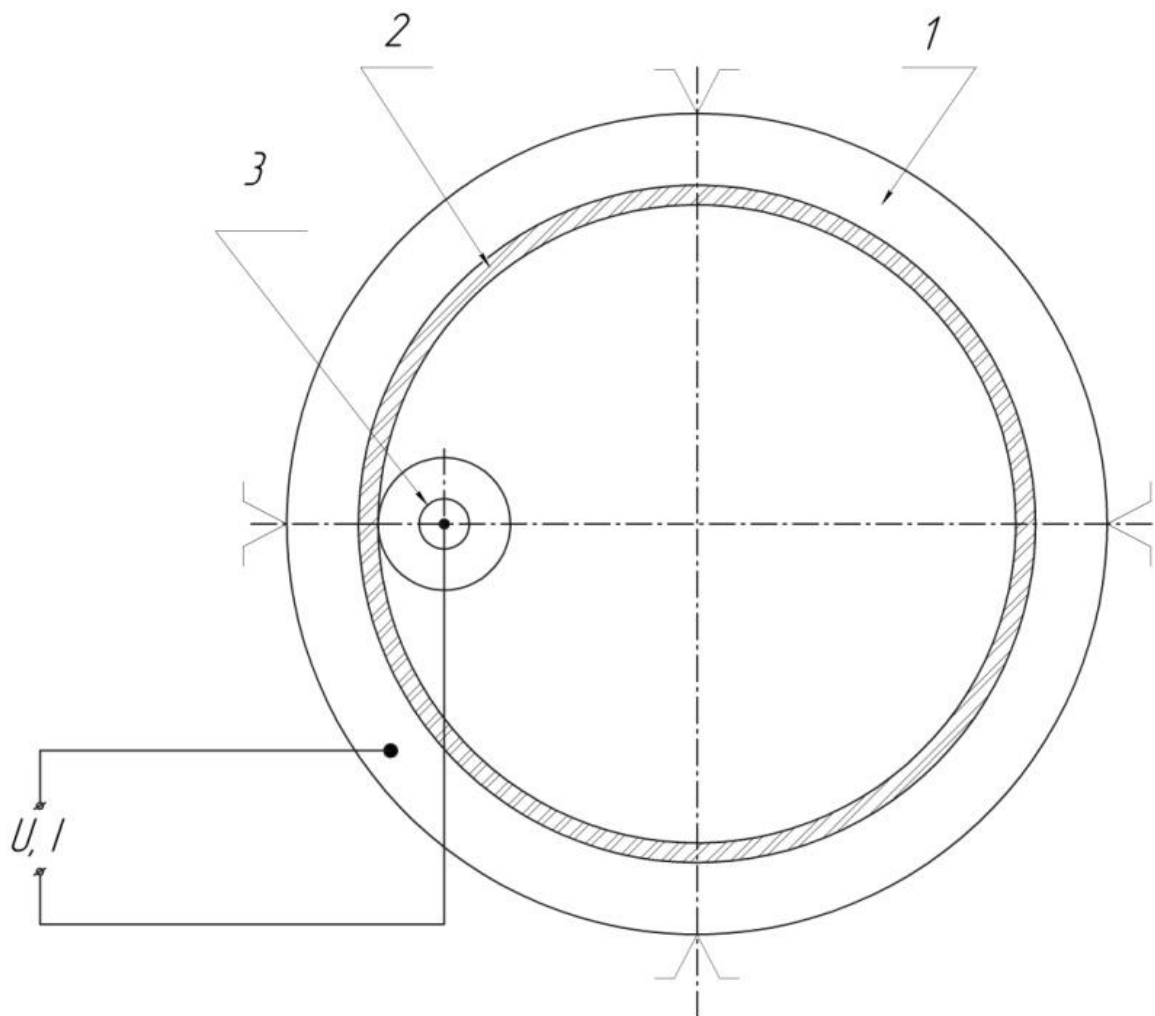
1 – роликові електроди; 2 – композиційна стрічка; 3 – деталь; 4 – джерело живлення

Рисунок 3.9 – Схематичне зображення контактної наварювання композиційної стрічки на деталь [53]

Окрім композиційної стрічки, наварювати на деталь можна сталеву або порошкову стрічку або дріт з відповідними вмістами та властивостями, а також припікати різні порошкові матеріали.

Перевагами контактної наварювання є відсутність нагрівання деталей, загартування поверхневих шарів металу деталі та нанесеного покриття просто під час процесу наварювання, зменшення витрат на присадні матеріали в 3...4 рази порівняно з іншими технологічними методами, висока продуктивність, відсутність вигорання складових легувальних елементів, можливість регулювання шару наварювання у межах від 0,1 мм до 3,5 мм [53].

Для наварювання композиційної стрічки на циліндричну поверхню підп'ятника було розроблено схему, яка наведена на рис. 3.10.



1 – підп'ятник; 2 – композиційна стрічка; 3 – роликовий електрод

Рисунок 3.10 – Схема наварювання композиційної стрічки на циліндричну поверхню підп'ятника

Для забезпечення достатньої міцності зчеплення композиційної стрічки з циліндричною поверхнею підп'ятника тиск на роликовому електроді повинен бути не нижче 60 МПа, а з метою запобігання значному зменшенню товщини стрічки – не повинен перевищувати 80 МПа. Швидкість наварювання композиційної стрічки на циліндричну поверхню підп'ятника необхідно вибирати в інтервалі 0,5...0,8 м/хв.

Сучасні погляди на величину та характер зносостійкості матеріалів, що наведені в роботах [2,5,9], свідчать про те, що ремонтний матеріал повинен бути не однокомпонентним, а композиційним, що має пластичну матрицю та наповнювач. Сама матриця є зв'язним компонентом між складовими

композиційного матеріалу, а також між самим покриттям та ремонтною поверхнею деталі. Вона передає навантаження від армувальних елементів до більш твердого наповнювача, на який діють питомі контактні тиски та навантаження, а величина його твердості перевищує твердість складових абразивного середовища, оскільки цей вид зносу в парі тертя «п'ятник – підп'ятник» є визначальним.

Для забезпечення потрібної зносостійкості композиційної стрічки [12,72,79] величина твердості матриці повинна лежати в межах 4000...6000 МПа, а різниця величин мікротвердості як армувальних, так і зв'язувальних фаз має дорівнювати 5000 МПа. Щоб досягти таких умов, матриця повинна бути з аустенітно-мартенситною структурою.

Зважаючи на досвід виготовлення зносостійких композиційних матеріалів [2,5,9], як наповнювачі можуть бути використані тверді матеріали: алмази, бориди, оксиди, нітриди, карбіди тощо. З позиції функціональних властивостей для ремонту підп'ятників може бути використано кожний із них. Але для формування композиційної стрічки найбільш доцільним за техніко-економічним критерієм твердим матеріалом є карбіди. До того ж для виготовлення зносостійких стрічок, матеріалів та покриттів практичного застосування набули Cr_3C_2 (карбіди хрому) та TiC (карбіди титану). Вони мають достатні для способів електричного наварювання чи припікання електропровідність та змочення металами групи заліза,.

За техніко-економічним критерієм для матеріалу матриці доцільне використання заліза (наприклад, порошок ПЖБ-5), якому властиві високі фізико-механічні та технологічні властивості. Вміст у порошку ПЖБ-5 0,25 % вуглецю дає можливість утворити з використанням електроконтактного наварювання підп'ятника загартовані структури, які забезпечують підвищення зносостійкості робочої циліндричної поверхні.

У роботах [74,76] вказано про позитивний вплив хрому як карбідоутворювального елемента на підвищення фізико-механічних властивостей сплавів.

Виготовлення композиційних стрічок є досить складним процесом через термомеханічну взаємодію заданих компонентів. Для поліпшення формування міцних зв'язків та необхідної електропровідності вихідної суміші, а також достатньої пластичності композиційних стрічок у роботі запропоновано введення до їх складу нікелю.

З практики відома доцільність використання плакованих порошків, вкритих ультратонким шаром [82], для структур яких характерна незрівноваженість. Підвищена активність порошків композиційної стрічки в умовах спікання чи обробки під час наварювання пов'язана з надмірним запасом поверхневої енергії, що зумовлено високою щільністю дислокацій в кристалічній ґратці, перебіг релаксаційних процесів у яких додатково забезпечує вільну енергію, тим самим допомагаючи підвищити дифузійну активність нікелю.

Отже, металева матриця композиційної стрічки буде складатися з потрібного сплаву, який містить порошок ПЖБ-5 на основі заліза, хром та нікель. Такі сплави набули широкого застосування в промисловості як високоміцні конструкційні матеріали. Під час утворення σ -фази спостерігається різке підвищення твердості, зниження ударної в'язкості й опору повзучості.

Відповідно до зміненої діаграми Маурера [72] (рис. 3.11) склад сплаву композиційної стрічки з мартенситною чи аустенітно-мартенситною структурою повинен вміщувати від 18 % до 24 % хрому, від 8 % до 13 % нікелю, а залишок від 63 % до 74 % – залізо.

Хімічний склад сплавів композиційної стрічки, які можуть бути рекомендовані до використання під час здійснення ремонту для підвищення зносостійкості підп'ятників, наведено в табл. 3.1.

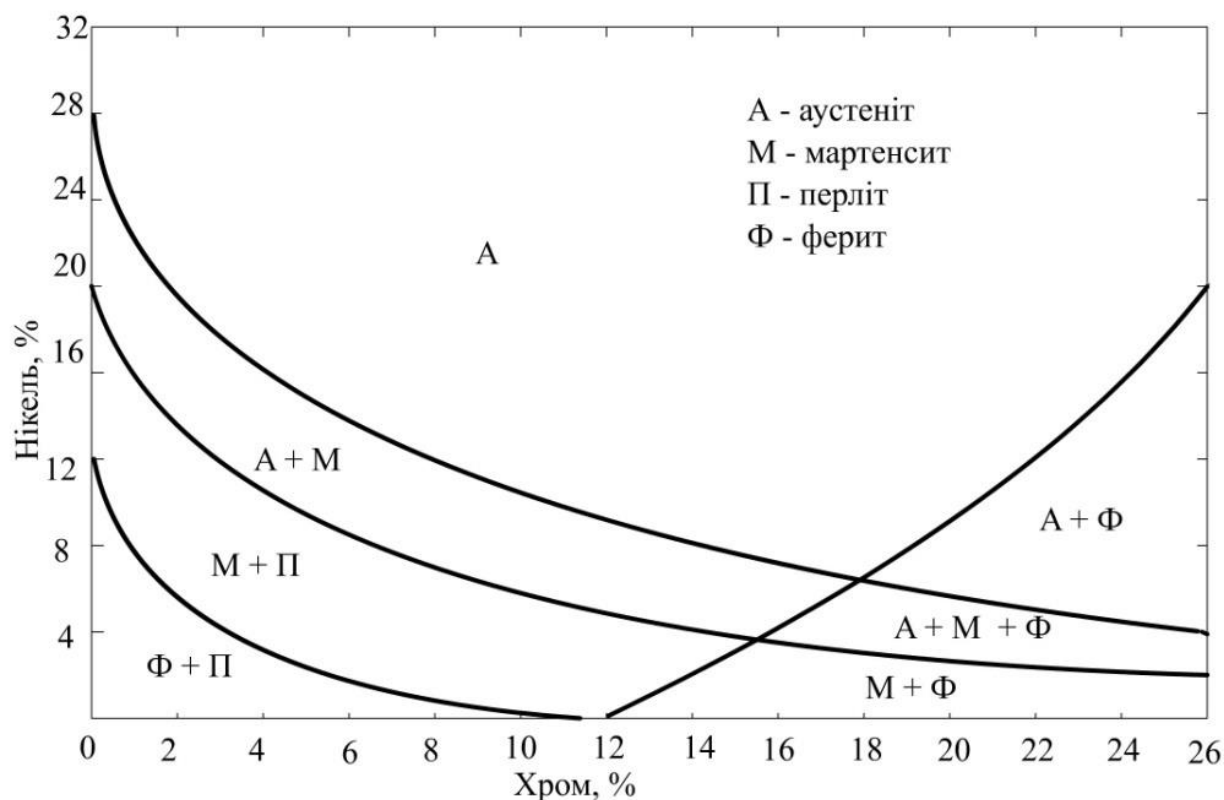


Рисунок 3.11 – Змінена діаграма Маурера [72]

Таблиця 3.1 – Рекомендований хімічний склад сплавів групи Cr- Fe- Ni
для композиційної стрічки, у відсотках

Можна рекомендувати			Краще не використовувати		
Cr	Fe	Ni	Cr	Fe	Ni
20	70	10	28	68	4
15	50	35	30	50	20

Зносостійкість навареного матеріалу композиційної стрічки залежить як від складу та твердості матриці, так і від об'ємного вмісту наповнювача. Оскільки за недостатнього його вмісту зносу підлягає матриця з подальшим викришуванням наповнювача, а за надлишкової кількості наповнювача – спостерігається підвищений знос матриці, пов'язаний з підвищеною пористістю й можливим викришуванням наповнювача.

Працездатність композиційної стрічки пов'язана з термомеханічною сумісністю фаз, що входять у склад матеріалу, а термомеханічна сумісність

таких фаз залежить від коефіцієнтів термічного розширення матеріалів матриці та розмірів наповнювачів.

Оскільки процес формування композиційного покриття відбувається за два етапи (формування композиційної стрічки та безпосереднє наварювання її на циліндричну поверхню підп'ятника), то термічну взаємодію фаз можна розглядати сумісно в процесі термомеханічної дії – як у процесі виготовлення композиційної стрічки (прокочування порошкової суміші у вальцях з подальшим спіканням у печі в інертному середовищі), так і в процесі контактного наварювання.

Далі розглянемо раціональний розподіл концентрації наповнювача в композиційній стрічці.

Як зазначалось раніше, процес зносу підп'ятника є нерівномірним. Тобто наварювання більш зносостійкої композиційної стрічки до циліндричної поверхні підп'ятника дає можливість вирівняти інтенсивність зносу в усіх його точках, а також зменшити величину зносу і, тим самим, підвищити міжремонтний ресурс п'ятникового вузла вантажного вагона.

З отриманого виразу для величини зносу циліндричної поверхні підп'ятника (3.26) можна бачити, що для зменшення цієї величини необхідно задати інші (вищі) властивості матеріалу підп'ятника.

Підбір необхідних властивостей для кожної точки зносу циліндричної поверхні підп'ятника повинен здійснюватися на основі зміни концентрації наповнювача композиційної стрічки.

Згідно з епюрою зносу підп'ятників і запропонованим розподілом твердості, що наведені в другому розділі (рис. 2.5–2.7), визначимо, якою повинна бути концентрація наповнювача композиційної стрічки для кожної точки циліндричної поверхні підп'ятника.

Для збереження циліндричної поверхні підп'ятника необхідно наварити композиційну стрічку так, щоб інтенсивність та величина зносу була однаковою в кожній його точці.

Оскільки найбільші значення величини зносу властиві 2-й та 4-й точкам

циліндричної поверхні підп'ятника, то досягнути рівномірності зносу за діаметром можна зниженням концентрації зміцнювального наповнювача в композиційній стрічці від 2-ї та 4-ї точок до точок 1 та 3.

Визначимо закономірність необхідного розподілу концентрації наповнювача в композиційній стрічці за діаметром підп'ятника. Виходимо з того, що концентрація наповнювача, яка припадає на одиницю довжини за діаметром, пропорційна концентрації, що необхідна для отримання такого зносостійкого та зміцненого шару, який у кожній точці циліндричної поверхні підп'ятника мав би однакову швидкість зношування, тобто:

$$\frac{dC}{dl} = KC, \quad (3.31)$$

де C – концентрація зміцнювального наповнювача в композиційній стрічці;

K – коефіцієнт, який залежить від властивостей матеріалів контактних поверхонь п'ятника та підп'ятника:

$$k = f \frac{E_1(1 - \mu_2^2)HB_1}{E_2(1 - \mu_1^2)HB_2}. \quad (3.32)$$

Крім того, величину модуля пружності композиційної стрічки можна визначити за формулою

$$E_2 = E_M(1 - C_H) + E_H C_H, \quad (3.33)$$

де C_H – концентрація наповнювача композиційної стрічки;

E_M – модуль пружності матриці композиційної стрічки;

E_H – модуль пружності наповнювача композиційної стрічки.

Також запишемо вираз для визначення твердості композиційної стрічки:

$$HB_2 = H_H \frac{H_M + H_H - C_H(H_H - H_M)}{H_M + H_H + C_H(H_H + H_M)}, \quad (3.34)$$

де H_M – твердість матриці;

H_H – твердість наповнювача.

Тоді вираз (3.32) набуде такого вигляду:

$$k = f \frac{E_1(1 - \mu_2^2)HB_1(H_M + H_H + C_H(H_H + H_M))}{(E_M(1 - C_H) + E_H C_H)(1 - \mu_1^2)H_H(H_M + H_H - C_H(H_H - H_M))}. \quad (3.35)$$

Проінтегрувавши диференціальне рівняння (3.31) з початковими умовами $l = 0$, $C_H = C_{0H}$ (де C_{0H} – максимально можлива концентрація наповнювача композиційної стрічки), здобуваємо такі вирази:

$$\int_{C_H}^{C_{0H}} \frac{dC}{C} = \int_0^l K d\ell, \quad (3.36)$$

$$\ln C \Big|_{C_H}^{C_{0H}} = K\ell. \quad (3.37)$$

Звідси

$$\ln \frac{C_{0H}}{C_H} = K\ell. \quad (3.38)$$

Проекспоненціюємо останній вираз, у результаті маємо відношення концентрацій

$$\frac{C_H}{C_{0H}} = \exp[-K\ell]. \quad (3.39)$$

Далі запишемо залежність для концентрації наповнювача композиційної стрічки від властивостей матеріалів сполучених поверхонь п'ятникового вузла вантажного вагона:

$$C = C_H \exp \left[-f \frac{E_1(1 - \mu_2^2)HB_1}{(E_M(1 - C_H) + E_H C_H)(1 - \mu_1^2)H_H} \times \right. \\ \left. \times \frac{H_M + H_H + C_H(H_H + H_M)}{H_M + H_H - C_H(H_H - H_M)} l \right]. \quad (3.40)$$

Отримана залежність (3.40) характеризує потрібний розподіл концентрації наповнювача композиційної стрічки за діаметром підп'ятника з урахуванням фізико-механічних властивостей елементів п'ятникового вузла, що взаємодіють, та властивостей композиційної стрічки, що забезпечить однакову, тобто рівномірну, інтенсивність та величину зносу в кожній точці циліндричної поверхні підп'ятника.

Графічно розподіл наповнювача в композиційній стрічці (у відсотковому співвідношенні) за довжиною циліндричної поверхні підп'ятника (для характерних точок, що вказані на рис. 3.6) наведено на рис. 3.11.

На графіку, зображеному на рис. 3.12, для спрощення представлення розподілу концентрації за діаметром підп'ятника в точках 2 і 4 відповідно до рис. 3.7 знак під експонентою у виразі (3.40) змінюється на протилежний.

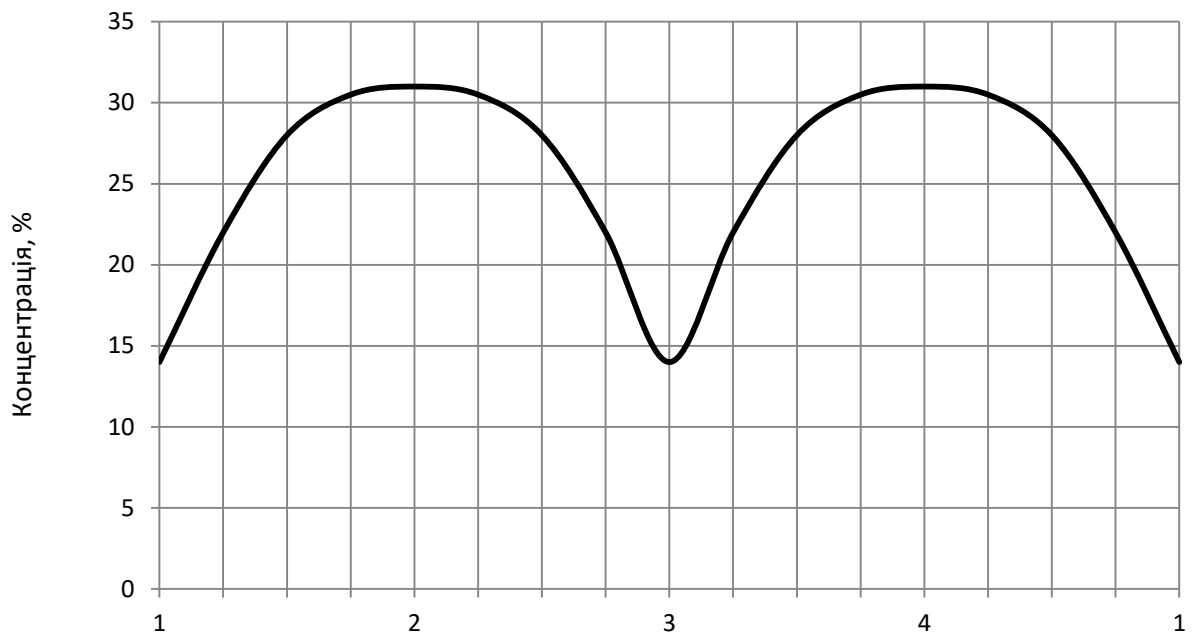


Рисунок 3.12 – Залежність концентрації наповнювача в композиційній стрічці за довжиною циліндричної поверхні підп'ятника

3.5 Отримання композиційних стрічок для підвищення зносостійкості п'ятникових вузлів вантажних вагонів

Виготовлення композиційних стрічок здійснювали на основі методів порошкової металургії. Технологія виготовлення передбачає такі операції:

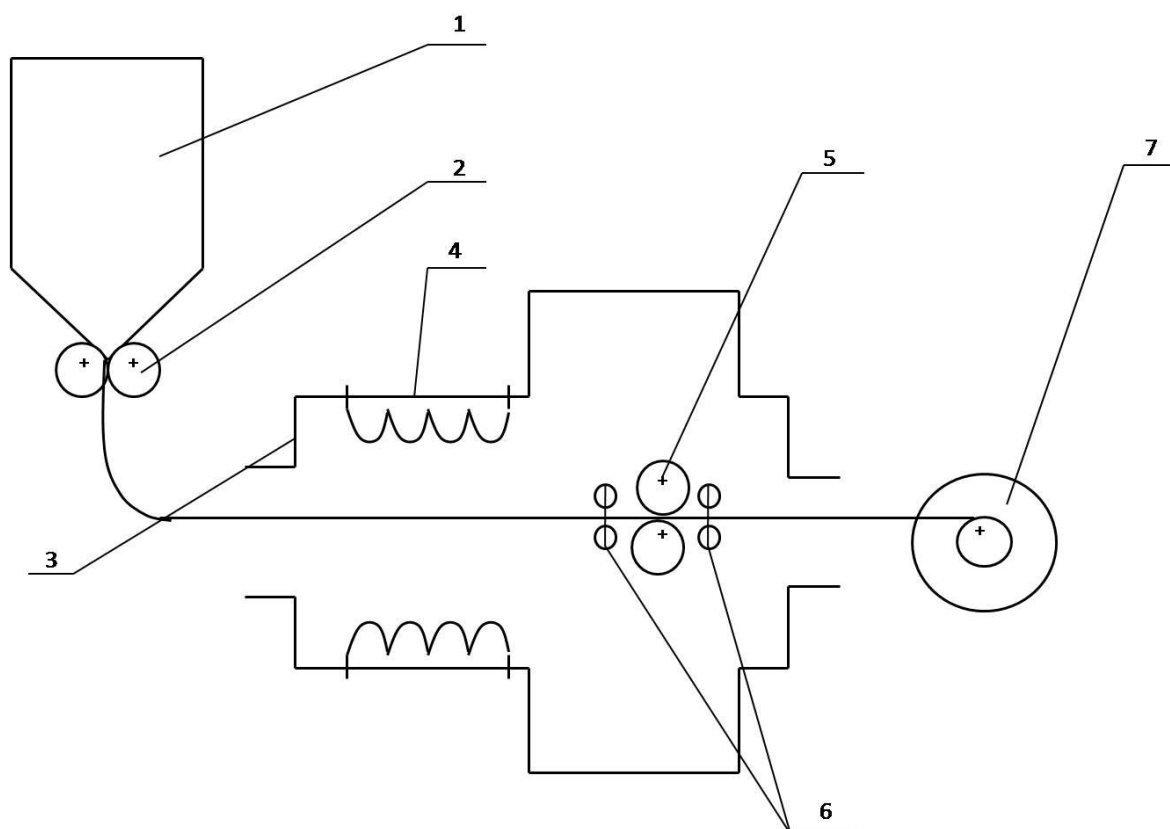
- змішування порошкових матеріалів з відповідними властивостями;
- покриття порошоків Ni з подальшим отриманням композиційних порошоків;
- введення зволожувача в отриману порошкову суміш;
- прокочування отриманої суміші на прокатному стані для отримання композиційної стрічки;
- спікання композиційної стрічки в середовищі інертних газів.

Перед виготовленням стрічки повинен виконуватися гранулометричний контроль наповнювача, наприклад з використанням лічильника «ТА-П» «Cultur», який дозволяє автоматично розподіляти частинки за їхніми розмірами.

Змішування порошкових матеріалів з відповідними властивостями може бути здійснене в змішувачі типу «п'яна діжка». Отриману механічну суміш завантажують у автоклав, де виконують плакування (покриття) порошоків Ni за допомогою гідрометалургійного способу. Прокочування цієї суміші для отримання композиційної стрічки може бути здійснене як на лабораторному, так і на промисловому верстаті.

В основу конструкції верстатів покладено принцип гравітаційної подачі порошкової суміші. Удосконалена схема процесу прокочування готової суміші для отримання композиційної стрічки наведена на рис. 3.13.

Ця схема удосконалена системою датчиків, що допомагає встановлювати та контролювати товщину композиційної стрічки за довжиною. Оскільки знос за діаметром підп'ятника нерівномірний, то в процесі ремонту необхідно наварювати композиційну стрічку, яка матиме змінну товщину. У результаті технологія ремонту підп'ятника не буде вимагати додаткової операції – механічної обробки як перед наварюванням, так і після, оскільки змінна товщина стрічки буде забезпечувати необхідний ремонтний розмір цієї поверхні.



1 – бункер; 2 – прокочувальні вальці; 3 – камера з інертним газом; 4 – піч для спікання; 5 – калібрувальні вальці; 6 – система датчиків товщини стрічки; 7 – котушка зі стрічкою

Рисунок 3.13 – Удосконалена схема процесу прокочування готової суміші для отримання композиційної стрічки

Перед засипанням готового композиційного порошку в бункер його необхідно зволожити (10 г води на 1 кг суміші).

Прокочування готової суміші для отримання композиційної стрічки здійснюється зі швидкістю 0,05 м/с, а сформована композиційна стрічка має відповідно закладену товщину. Спікання вихідних композиційних стрічок здійснюється в прохідній печі у середовищі водню з витримкою за відповідної температури протягом декількох годин.

Загальний вигляд композиційних стрічок, що можна отримати за описаною вище технологією, наведено на рис. 3.14.

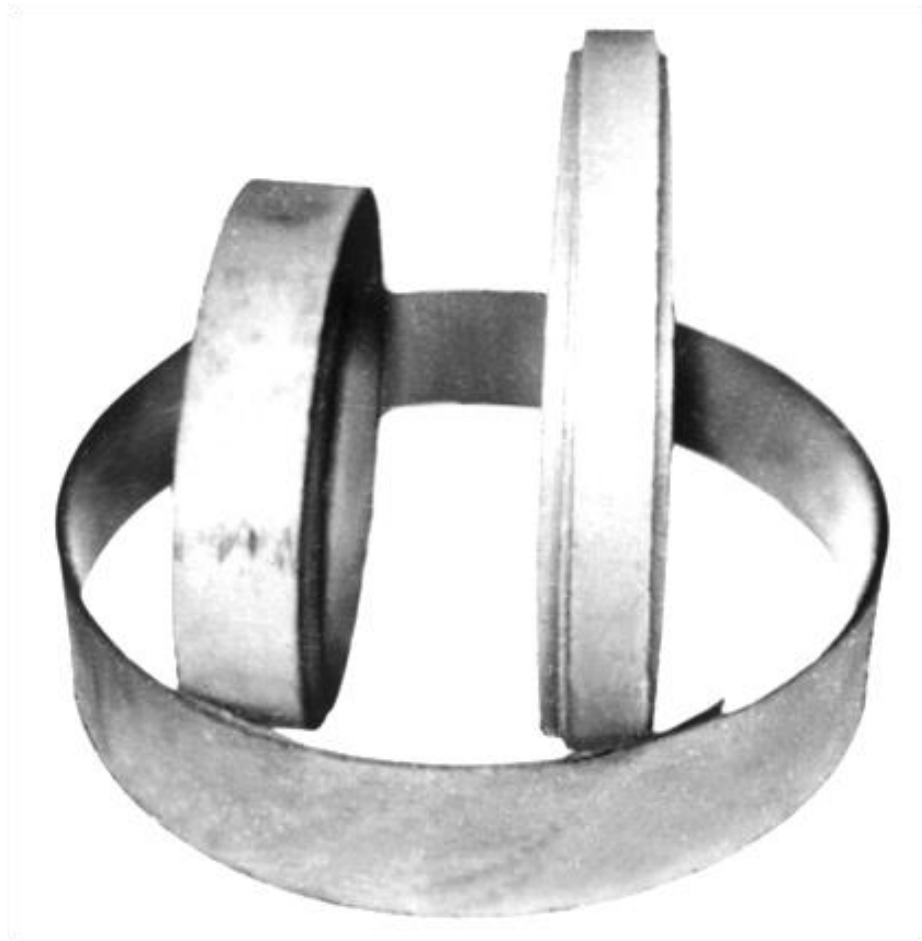


Рисунок 3.14 – Загальний вигляд композиційних стрічок

3.6 Величина зносу підп'ятника та міжремонтний ресурс п'ятникового вузла

Застосування композиційної стрічки під час ремонту п'ятникового вузла вантажного вагона сприяє підвищенню міцнісних та зносостійких властивостей циліндричної поверхні підп'ятника, тобто в процесі експлуатації відремонтованого вагона зміниться й величина зносу.

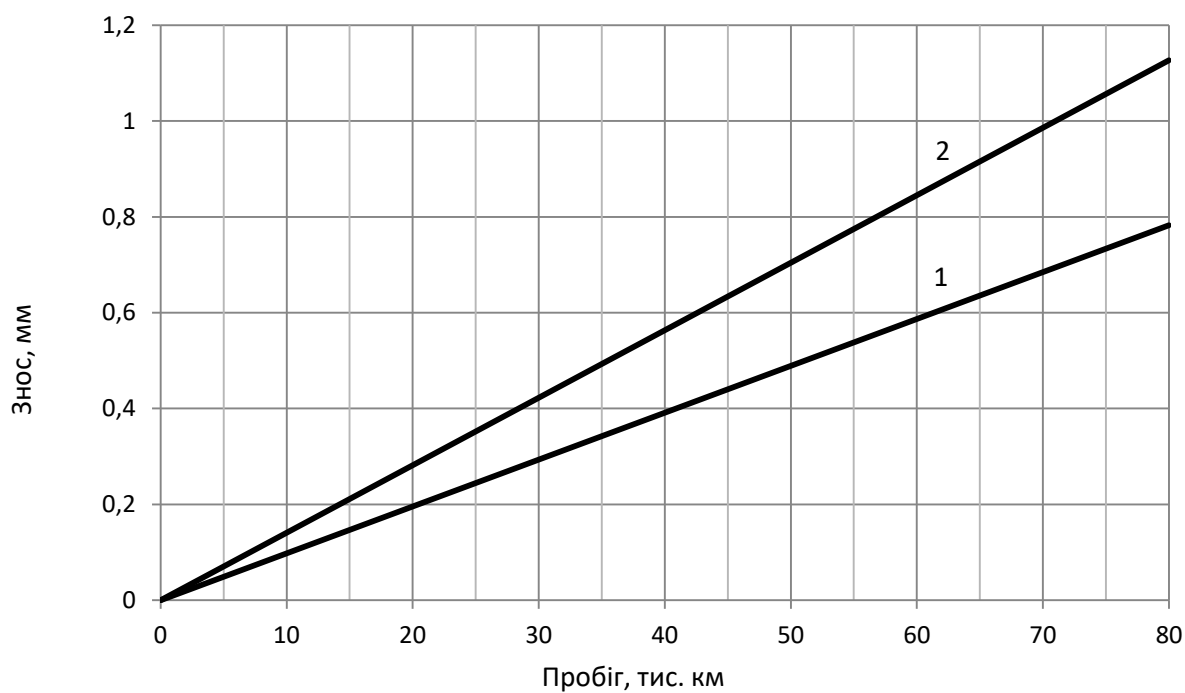
Запишемо вираз (3.26) для величини зносу циліндричної поверхні підп'ятника з урахуванням властивостей матриці та наповнювача навареної композиційної стрічки в такому вигляді:

$$\delta_{FN} = f \frac{E_1(1 - \mu_2^2)^2 HB_1(H_M + H_H + C_H(H_H + H_M)) L}{(E_M(1 - C_H) + E_H C_H)^2 (1 - \mu_1^2) H_H h d_1 \alpha} \frac{L}{v} \times \frac{\omega d_2 (\Sigma Q \cos \varphi + \Sigma N \sin \varphi)}{H_M + H_H - C_H(H_H - H_M)}. \quad (3.41)$$

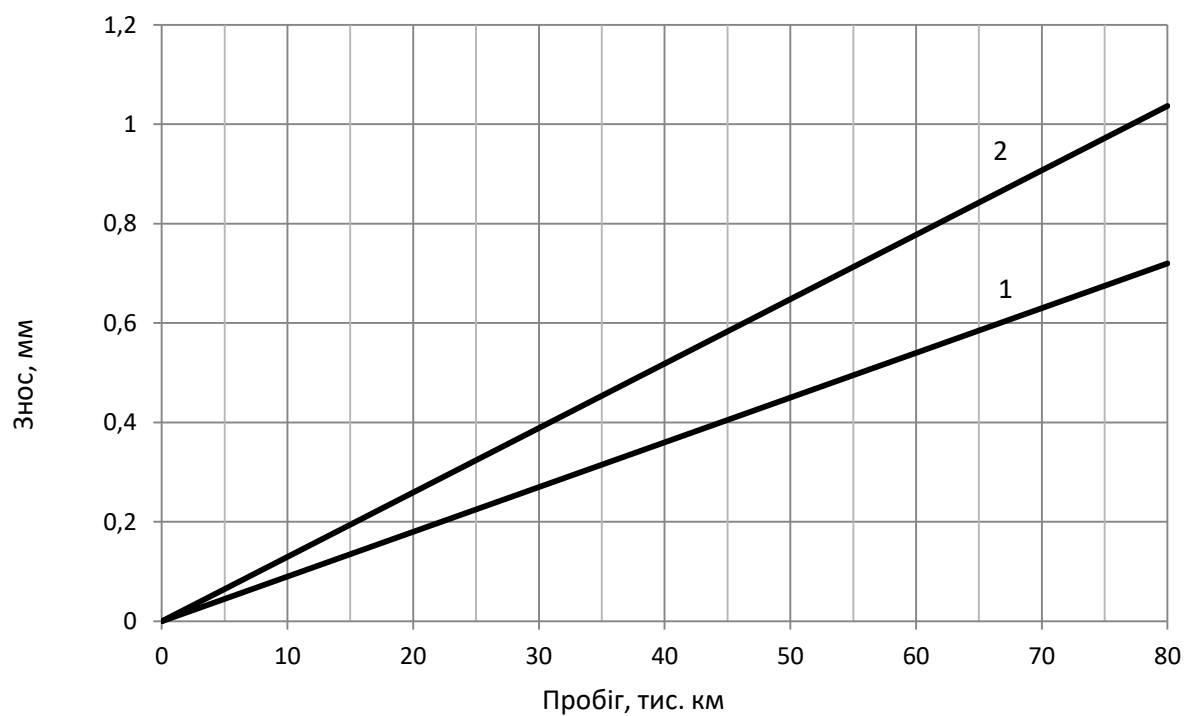
На основі отриманого виразу (3.41) побудуємо залежності величини зносу підп'ятника для піввагона моделі 12-7023, який рухається у складі поїзда зі швидкістю 90 км/год, у разі наварювання композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ (рис. 3.15, а) і складу Fe-Cr-Ni-TiC (рис. 3.15, б) з дискретними властивостями за довжиною діаметра підп'ятника із коефіцієнтом використання пробігу 0,5 та 0,7.

З рис. 3.15 видно, що під час ремонту підп'ятника з навареною композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-TiC величина зносу циліндричної поверхні підп'ятника для піввагона моделі 12-7023 на 9 % нижча порівняно із зносом з навареною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂. Таке можна пояснити більшою твердістю та зносостійкістю композиційної стрічки Fe-Cr-Ni-TiC.

Якщо порівняти дані, наведені на рис. 3.6 та рис. 3.15 для величини зносу циліндричної поверхні підп'ятника для піввагона моделі 12-7023, то маємо таке. По-перше, на рис. 3.5 наведено середню величину зносу, тобто різні значення в точках 1, 2 та 3, 4, а на рис. 3.15 показано залежність величини зносу, яка в межах похибки практично не відрізняється в кожній точці циліндричної поверхні підп'ятника, що досягнуто за рахунок дискретних властивостей композиційної стрічки за діаметром. По-друге, величина зносу відремонтованого підп'ятника менша в 2...2,7 раза порівняно з базовим варіантом.



а



б

Рисунок 3.15 – Теоретичні залежності величини зносу підп'ятника піввагона моделі 12-7023 із використанням композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ (а) і складу Fe-Cr-Ni-TiC (б) за коефіцієнта використання пробігу: 1 – 0,5; 2 – 0,7

Прогнозований міжремонтний ресурс п'ятникового вузла піввагона моделі 12-7023 за зносом циліндричної поверхні підп'ятника становить 160 тис. км пробігу (за зносом п'ятника ця величина в 2,5...4,0 раза вище), тоді як мінімальне значення прогнозованого міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла цього ж піввагона з відремонтованими підп'ятниками з навареною композиційною стрічкою становлять 320 тис. км (за зносом п'ятника ця величина в 2,0...3,0 раза вища), що вказує на доцільність застосування запропонованих технологічних заходів.

Висновки до розділу 3

Результатом виконання теоретичних досліджень міжремонтного ресурсу візків вантажних вагонів, у яких ресурсовизначальним елементом є п'ятниковий вузол, є такі висновки:

1. Для встановлення меж розподілу відновлюваного матеріалу по діаметру підп'ятника було розглянуто втомний процес зносу під час його взаємодії з п'ятником і описано геометрію поверхні його зносу підп'ятника. Крім того, було запропоновано математичну модель для визначення вихідної геометрії поверхні підп'ятника на відповідному життєвому циклі візка вантажного вагона.

2. Розглянуто взаємодію циліндричних поверхонь пари тертя «п'ятник – підп'ятник» вантажного вагона й вперше отримано залежність величини зносу підп'ятника від пробігу, що враховує силове навантаження, фізико-механічні та триботехнічні властивості матеріалів сполучених поверхонь. На основі отриманої залежності на прикладі піввагона моделі 12-7023 встановлено, що середня величина зносу підп'ятника цього піввагона досягає 2 мм за пробігу 80 тис. км.

3. У ході розгляду взаємодії елементів пари «п'ятник – підп'ятник» вантажного вагона у момент прикладання зусилля тяги запропоновано вираз для визначення зазору.

4. Теоретично обґрунтовано застосування композиційних стрічок для наварювання їх на циліндричну поверхню підп'ятника. Розглянуто раціональний розподіл концентрації наповнювача в композиційній стрічці, у результаті якого отримано залежність, яка характеризує потрібний розподіл концентрації наповнювача композиційної стрічки за діаметром підп'ятника з урахуванням фізико-механічних властивостей елементів п'ятникового вузла, що взаємодіють, та властивостей композиційної стрічки, при цьому забезпечуючи рівномірний знос у кожній точці циліндричної поверхні підп'ятника.

5. Установлено, що в разі застосування композиційної стрічки під час ремонту п'ятникового вузла вантажного вагона відбувається підвищення міцнісних та зносостійких властивостей циліндричної поверхні підп'ятника, тобто в процесі експлуатації відремонтованого вагона зміниться і величина зносу, яка менша в 2...2,7 рази порівняно з базовим варіантом. Прогнозований міжремонтний ресурс п'ятникового вузла піввагона з відремонтованими підп'ятниками з навареною композиційною стрічкою становить 320 тис. км (за зносом п'ятника ця величина в 2,0...3,0 рази вище), що вказує на доцільність застосування запропонованих технологічних заходів.

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ СПОЛУЧЕНИХ ПОВЕРХОНЬ П'ЯТНИКОВОГО ВУЗЛА

4.1 Методика досліджень структури, елементного складу та фізико-механічних властивостей відновлених поверхонь п'ятникового вузла

Мікроструктура та елементний склад. Мікроструктуру композиційних стрічок, наварених на циліндричну поверхню підп'ятника вантажного вагона, визначали на основі методів світлової мікроскопії. На підготовлених зразках (мікрошліфи) виконувався металографічний аналіз за допомогою мікроскопа «Neophot-30».

Для визначення хімічного складу цих композиційних стрічок, дослідження їх міжфазної взаємодії, характеру розподілу елементів після наварювання, вивчення дифузії основних елементів на границі циліндричної поверхні та стрічки було використано мікрорентгеноспектральний аналізатор «Camebax microbeam». Він надає можливість виконувати кількісний і якісний аналіз отриманого покриття. Кількісний аналіз покриття здійснювався на відстані 200 мкм з поступовим кроком 10 мкм.

Мікротвердість. Мікротвердість наварених композиційних стрічок на підготовлених зразках вивчалася за допомогою приладу ПМТ-3 відповідно до відносно нового стандарту ДСТУ ISO 6506-1:2007. Обробку результатів здійснювали методами математичної статистики.

Пористість. Пористість наварених композиційних стрічок досліджувалася на підготовлених зразках металографічним методом. На отриманих зразках визначався розподіл пор за їхніми розмірами, їхня щільність у матеріалі, середня відстань між порами, відсотковий вміст тощо. В основу цього методу покладено принцип стереоскопічної металографії. Кількісно пористість наварених композиційних стрічок на підготовлених

зразках визначали методом площ, який ґрунтується на розрахунку відношення площі, яка зайнята порами, до загальної площі досліджуваної ділянки зразка. З метою підвищення ефективності й точності досліджень величину пористості наварених композиційних стрічок на підготовлених зразках оцінювали на пристрої «Омнімет» (США) з автоматичним аналізом та скануванням у площині зображення зразка електронним променем.

Внутрішні напруження. Оскільки існуючі технологічні способи зміцнення та відновлення деталей супроводжуються зміною їхніх фізико-механічних властивостей за товщиною поверхневого шару [72], що призводить до виникнення в них залишкових напружень, то існує необхідність у дослідженні внутрішніх напружень після наварювання композиційних стрічок.

Залишкові напруження в деталях визначають механічними чи фізичними методами [117]. Механічні методи базуються на визначенні деформацій, які виникають у результаті видалення з поверхні деталі (зразка) шару металу. Ці методи мають значну похибку й використовуються рідко.

Структурно-напружений стан наварених композиційних стрічок на підготовлених зразках та наявність в них деформацій визначалися на основі рентгенівських досліджень.

Експериментальне визначення залишкових напружень I роду в наварених композиційних стрічках виконували « $\text{Sin}^2\psi$ »-методом на дифрактометрі «ДРОН-3М». Структурно-напружений стан оцінювався за зсувом і за розширенням ліній на дифрактограмі. За розширенням ліній β оцінювали величину напружень II роду в наварених композиційних стрічках.

Дослідження здійснювали на зразках у поперечному перерізі, пошарово знімаючи певну товщину покриття за глибиною. Вихідна товщина покриття становить $0,4 \cdot 10^{-3} \dots 0,8 \cdot 10^{-3}$ м. Попередньо шари товщиною $2 \cdot 10^{-3}$ м знімали шліфуванням за допомогою алмазних кругів. Застосування алмазних кругів виключало виникнення додаткових порушень будови матриці композиційних

стрічок та викришування карбідної фази. Операції шліфування виконували з використанням рідинного охолодження з метою зменшення термічного впливу на зразок під час шліфування. Для зняття залишків наклепаного шару, що залишився після шліфування зразків з композиційних стрічок, поверхню полірували електролітичним способом [86]. Промивання зразків з композиційних стрічок від продуктів травлення здійснювали послідовно в ацетоні, метиловому спирті та хімічно чистому бензині.

Розрахунок напружень II роду й розміру блоків виконували з використанням методу апроксимації, а також методу гармонійного аналізу [86]. У методі апроксимації необхідно одержати профілі однієї й тієї самої лінії на дифрактограмі від досліджуваного зразка й еталона. Ширина лінії від еталона повинна зумовлюватися тільки геометричними факторами. За отриманими профілями ліній для зразка $h(x)$ і еталона $g(x)$ визначали відповідно півширину ліній B і b .

Величину мікронапружень зразків з навареними композиційними стрічками оцінювали за виразом [86]

$$\sigma = \frac{\Delta}{d} E = \frac{\beta}{\operatorname{tg} \theta} E, \quad (4.1)$$

де E – модуль пружності зразків з навареними композиційними стрічками, МПа;

Δ – максимальне відхилення міжплощинної відстані цієї дифрактометричної лінії від її середнього значення, мкм;

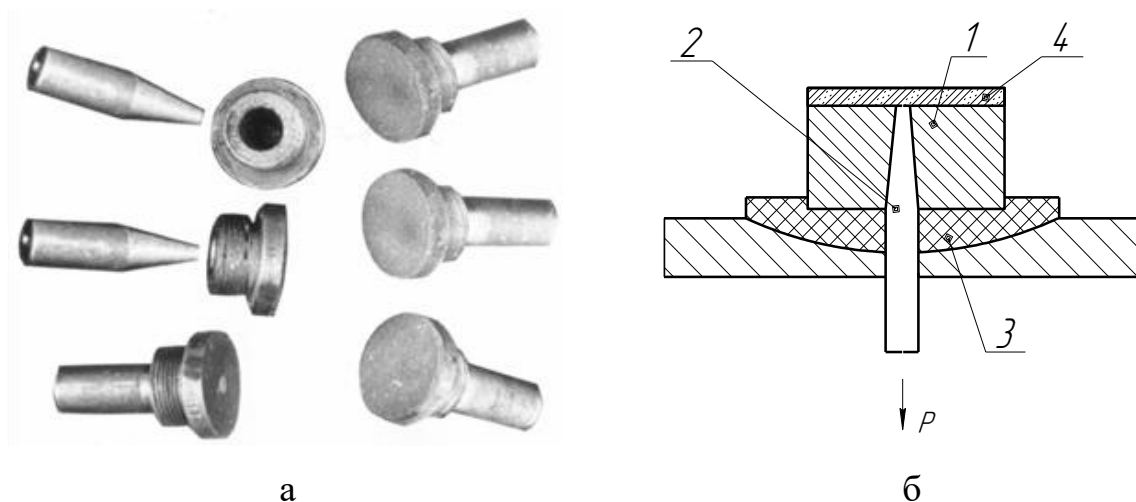
d – міжплощинна відстань, мкм;

θ – положення k -го дифракційного максимуму.

Міцність зчеплення композиційної стрічки з циліндричною поверхнею підп'ятника. Основним критерієм із визначення довговічності відновлювальних шарів деталей є міцність їхнього зчеплення [32]. Ця

властивість визначається як технологічними характеристиками процесу зміцнення, так і властивостями матеріалів покриття і основи.

Міцність зчеплення композиційної стрічки з циліндричною поверхнею підп'ятника визначали методом відриву штифта. Загальний вигляд зразків та схему визначення міцності зчеплення наведено на рис. 4.1.



1 – оправка; 2 – штифт; 3 – упор; 4 – композиційна стрічка

Рисунок 4.1 – Загальний вигляд зразків (а) та схема (б) визначення міцності зчеплення покриття з основою методом відриву штифта

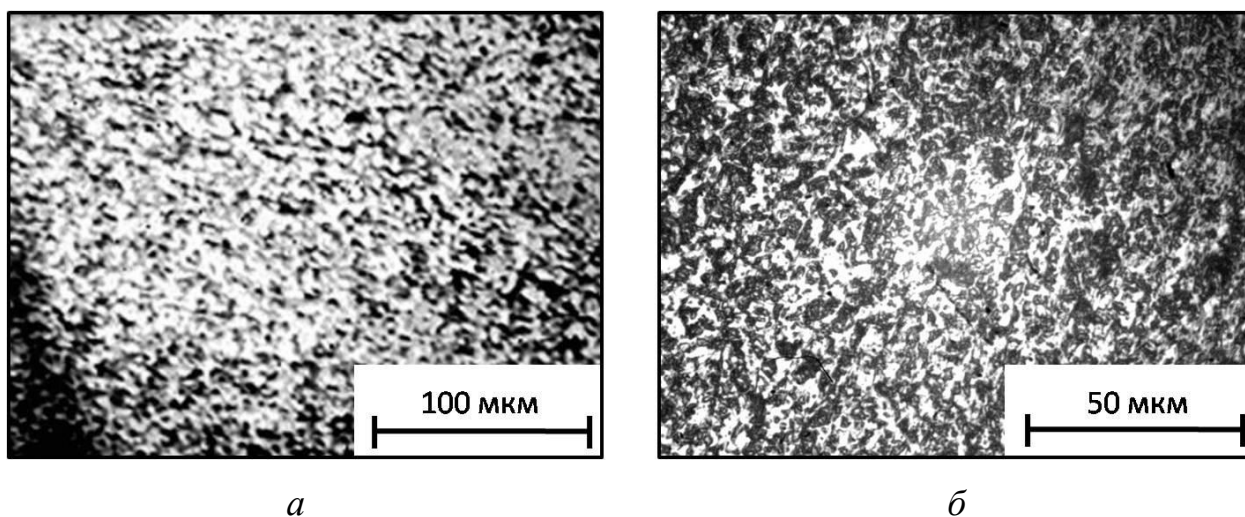
У конічний центральний отвір, який виконано в оправці 1 з основного металу, вставляють штифт 2 так, щоб торцева поверхня штифта й поверхні оправки знаходилися в одній площині. Залежно від форми центрального отвору штифт виконують циліндричним або конічним.

На поверхню оправки й штифта приварюють композиційну стрічку 4, після чого до штифта прикладають зусилля. Відношення величини навантаження, за якого відбувається відрив штифта від стрічки, до площі його наплавленого торця характеризує міцність зчеплення покриття з основою.

4.2 Результати досліджень структури, елементного складу й фізико-механічних властивостей відновлених поверхонь п'ятникового вузла

4.2.1 Структура та склад відновлених поверхонь

Мікроструктуру поверхонь наварених композиційних стрічок обох складів наведено на рис. 4.2.



a – склад Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂; *б* – склад Fe-Cr-Ni-TiC

Рисунок 4.2 – Мікроструктура поверхонь наварених композиційних стрічок

Компоненти стрічок досить рівномірно розподілені по структурі. Спостерігається висока дифузійна активність нікелю, що, очевидно, пояснюється його ультрадисперсною структурою, яка характеризується значною кількістю активних центрів (надлишкових вакансій). Під час взаємодії плакувального шару з компонентами стрічки виникає реактивна дифузія, яка супроводжується утворенням нових фаз: інтерметалідів та твердих розчинів. Цей процес є специфічним для композиційних порошків, отриманих гідрометалургійним методом. Хром і залізо мають звичайну структуру, тому не встигають під час спікання стрічки розподілитися в матеріалі більш рівномірно.

Вплив мікроструктури на властивості наварених композиційних стрічок очевидний з позиції об'ємного розподілу фаз, форми й розмірів компонентів покриття та структури матриці. На рис. 4.2 видно, що дисперсні частинки

карбідів досить рівномірно розподілені в матриці композиційної стрічки, крім того, їхнє подрібнення в процесі наварювання практично не спостерігається. Це пояснюється правильним вибором параметрів режиму наварювання, незначною термічною дією на композиційний матеріал, термомеханічною сумісністю фаз у покритті, правильністю вибору розміру наповнювача, а також тим, що компоненти композиційного матеріалу плаковані нікелем. Матриця композиційної стрічки, як і передбачалось, має аустенітно-мартенситну та трооститно-мартенситну мікроструктуру. Гранична зона між керамічним наповнювачем та матрицею є дещо розмитою, що вказує на перебіг процесу міжфазної взаємодії в композиційній стрічці. Це пояснюється певною розчинністю карбідів у металах матриці та дифузійними процесами, які відбуваються в матеріалі. При цьому карбід хрому взаємодіє з матрицею більш активно, ніж карбід титану, що пояснюється його більшою розчинністю в металах групи заліза.

Результати досліджень рівномірності розподілу вихідних компонентів матриць композиційних стрічок, що здійснювалися шляхом кількісного аналізу, наведено в табл. 4.1.

Концентрація компонентів матриці для композиційної стрічки обох складів приблизно однакова й лежить у межах проєктних значень, що підтверджує правильність вибору способу отримання композиційного матеріалу. Лише концентрація хрому незначно виходить за межі проєктної величини. Для першого складу вона дещо більша, що пояснюється додатковим насиченням матриці хромом у результаті підрозчинення карбіду хрому, а для другого – дещо менша, з огляду на те що, будучи гарним карбідоутворювальним елементом, утворює в матриці нові дрібні карбіди, з'єднуючись з вуглецем, який вивільнився в результаті підрозчинення в матеріалах матриці (залізо, нікель) карбіду титану, та вуглецем, який введений у матрицю разом з порошком заліза.

Таблиця 4.1 – Результати рентгеноспектрального аналізу матриць композиційних стрічок

Склад	Концентрація елементів у матриці, мас.%			
	Залізо	Хром	Нікель	Титан
Fe-Cr-Ni- Cr ₃ C ₂	$\frac{52,1 - 73,2}{59,2}$	$\frac{10,3 - 37,6}{23,5}$	$\frac{0,2 - 16,6}{8,3}$	-
Fe-Cr-Ni-TiC	$\frac{62,5 - 77,0}{68,0}$	$\frac{7,2 - 20,4}{12,13}$	$\frac{3,3 - 27,1}{9,5}$	$\frac{0,3 - 3,7}{1,2}$

Примітка: у чисельнику – границі концентрацій; у знаменнику – середнє значення за 20-ма точками аналізу.

Рентгенографічні дослідження показали, що зміни субструктури подібні змінам, що спостерігаються під час гартування. Матеріал композиційної стрічки являє собою сильно подрібнену субструктуру з великими мікроспотвореннями й високою щільністю дислокацій.

Електронно-мікроскопічний аналіз показав, що в найбільш зміцненій ділянці композиційної стрічки спостерігається значна щільність дрібних дислокаційних петель, що свідчить про інтенсивні процеси деформування структури за такого складу. Також наявні поодинокі дислокації та їхні сплетіння, що підтверджують взаємодію дислокацій, а в матеріалі виникає комірчаста дислокаційна структура зі щільністю дислокацій на границях комірок до $10^{14}...10^{15} \text{ м}^{-2}$. Подібна структура характерна для сильно деформованих металів.

Підвищення щільності дислокацій пов'язане з появою термічних напружень, які, зі свого боку, зумовлені відмінністю питомих об'ємів і коефіцієнтів лінійного розширення одночасно існуючих фаз.

Дослідження розподілу концентрації наповнювача, а саме карбіду хрому, у характеристичному рентгенівському випромінюванні за допомогою спектрального мікроаналізу наведено на рис. 4.3.

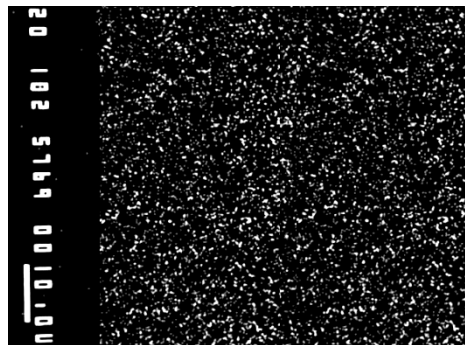


Рисунок 4.3 – Розподіл концентрації наповнювача Cr_3C_2 (30 %) у навареній композиційній стрічці складу Fe-Cr-Ni- Cr_3C_2

Аналогічну картину розподілу концентрації наповнювача в поверхневих шарах навареної композиційної стрічки спостерігали й для складі Fe-Cr-Ni-TiC.

Методом електронної оже-спектроскопії було зафіксовано елементний склад поверхневих шарів наварених композиційних стрічок (рис. 4.4, 4.5). Виявлено, що в поверхневих шарах композиційної стрічки спостерігається перерозподіл її компонентів, а також домішок. В усіх знятих спектрах був присутній кисень, привнесений у досліджувану поверхню стрічки з атмосферного середовища.

Оже-спектри, зняті за глибиною досліджуваних наварених композиційних стрічок, показали, що компоненти мають постійний склад, а атоми домішок перерозподіляються, причому деякі мігрують до поверхні зразка, деякі від поверхні, а деякі – в обох напрямках.

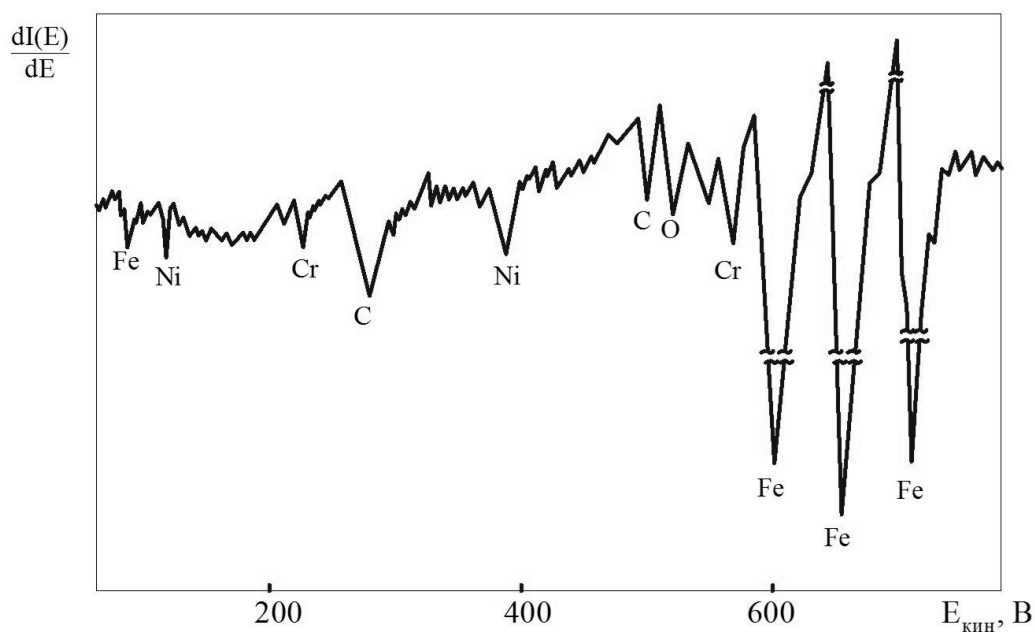


Рисунок 4.4 – Ділянка оже-спектра, знятого з поверхні навареної композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂

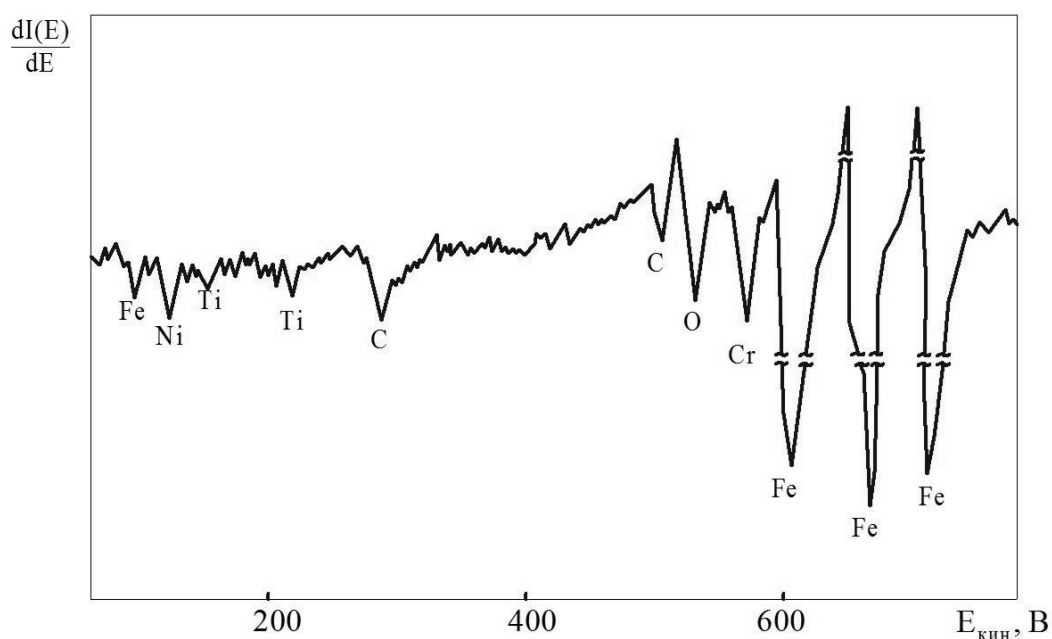
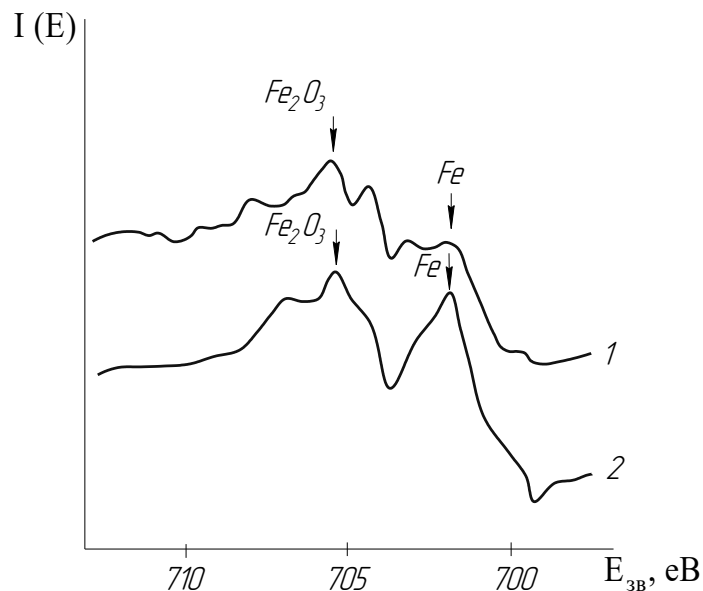


Рисунок 4.5 – Ділянка оже-спектра, знятого з поверхні композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-TiC

У зоні спікання композиційної стрічки під час наварювання інтенсифікуються й процеси утворення деяких сполук. Так, на повітрі на поверхні стрічок утворюються острівці оксидів заліза, виявлені рентгенівським фотоелектронним аналізом (рис. 4.6).



1 – склад Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂; 2 – склад Fe-Cr-Ni-TiC

Рисунок 4.6 – Рентгенівський фотоелектронний спектр оксиду заліза в навареній композиційній стрічці

Характерним є те, що порівняно із навареною композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-TiC величина піка рентгенівського фотоелектронного спектра для Fe₂O₃ є меншою.

4.2.2 Мікротвердість сформованих поверхневих шарів циліндричної поверхні підп'ятника

Відомо [73], що твердість композиційних матеріалів, отриманих термоспінанням, є визначальною для забезпечення зносостійкості відновлювальних поверхонь. Особливо це стосується п'ятникових вузлів, що піддаються механізму абразивного зносу.

Під час вимірювання мікротвердості наварених композиційних стрічок бралось до уваги те, що їхні поверхневі шари мають гетерогенну структуру, яка передбачає, як мінімум, три зони твердості: твердість наповнювача (Cr₃C₂, TiC), твердість матриці, яка являє собою продукт взаємодії трьох компонентів

(залізо, нікель, хром) і твердість проміжних з'єднань, які виникають у результаті міжфазної взаємодії.

Для унаочнення результатів вимірювань розподілу середньої мікротвердості сформованих поверхневих шарів циліндричної поверхні підп'ятника в разі наварення композиційної стрічки з концентрацією наповнювача 30 % отриману інформацію наведено у вигляді гістограм (рис. 4.7, 4.8). Крім того, відношення кількості отриманих відбитків на поверхні певної твердості до сумарної кількості відбитків цієї самої поверхні подано у відсотках.

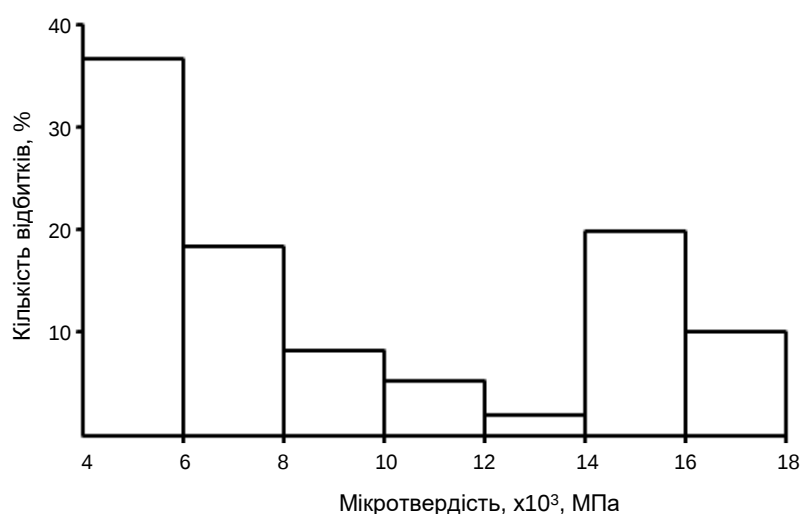


Рисунок 4.7 – Мікротвердість сформованих поверхневих шарів циліндричної поверхні підп'ятника з навареною композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂

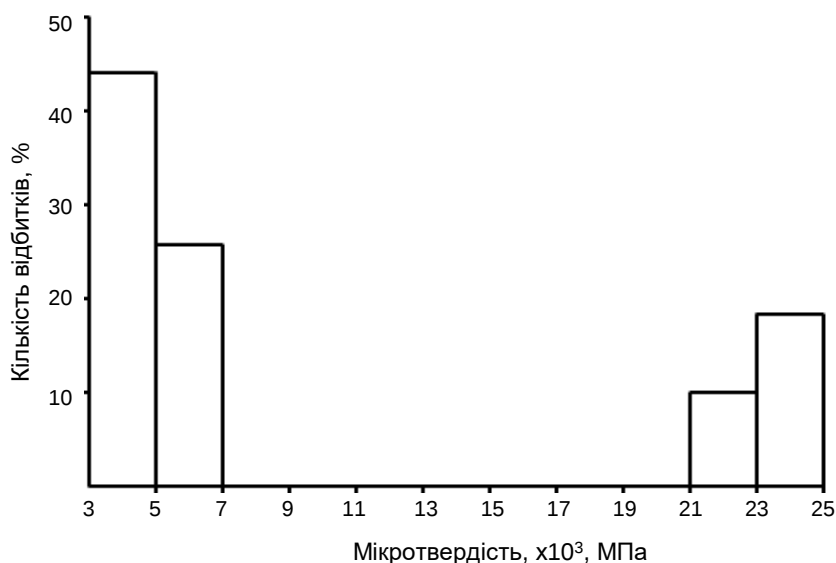


Рисунок 4.8 – Мікротвердість сформованих поверхневих шарів
циліндричної поверхні підп'ятника з навареною композиційною стрічкою
складу Fe-Cr-Ni-TiC

Отримані результати (див. рис. 4.7, 4.8) показують, що мікротвердість матриці лежить у проєктних межах і забезпечує працездатність навареної композиційної стрічки в умовах механізму абразивного зносу.

Для навареної композиційної стрічки, що армована карбідом хрому, приблизно 60 % матриці має мікротвердість 6000...8000 МПа, що вказує на наявність у ній загартованих структур, а також продуктів хімічної взаємодії матричного хрому з вуглецем порошку заліза. Наявність у матриці сформованого шару мікротвердістю 10000...14000 МПа, здебільшого на границі фаз, вказує на утворення продуктів хімічної взаємодії складових компонентів самої матриці і Cr_3C_2 у результаті його підрозчинення та дифундування вуглецю в матеріал саме матриці. Мікротвердість матриці сформованого шару менше ніж 4000 МПа спостерігається у 4 % випадків.

Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі навареної стрічки, яка армована TiC, є диференційованим, що вказує на наявність незначної кількості продуктів хімічної взаємодії компонентів. Це явище можна пояснити досить низькою розчинністю TiC у компонентах сформованої матриці. Мікротвердість сформованої матриці 3000...7000 МПа лежить у дещо нижчих межах порівняно з проєктними значеннями.

Розподіл мікротвердості матриці сформованих поверхневих шарів циліндричної поверхні підп'ятника залежно від вмісту наповнювача в композиційній стрічці має особливе значення для підтвердження правильної кількості його призначення. Результати залежностей мікротвердості матриці сформованих поверхневих шарів від вмісту наповнювача в композиційній стрічці наведено в табл. 4.2.

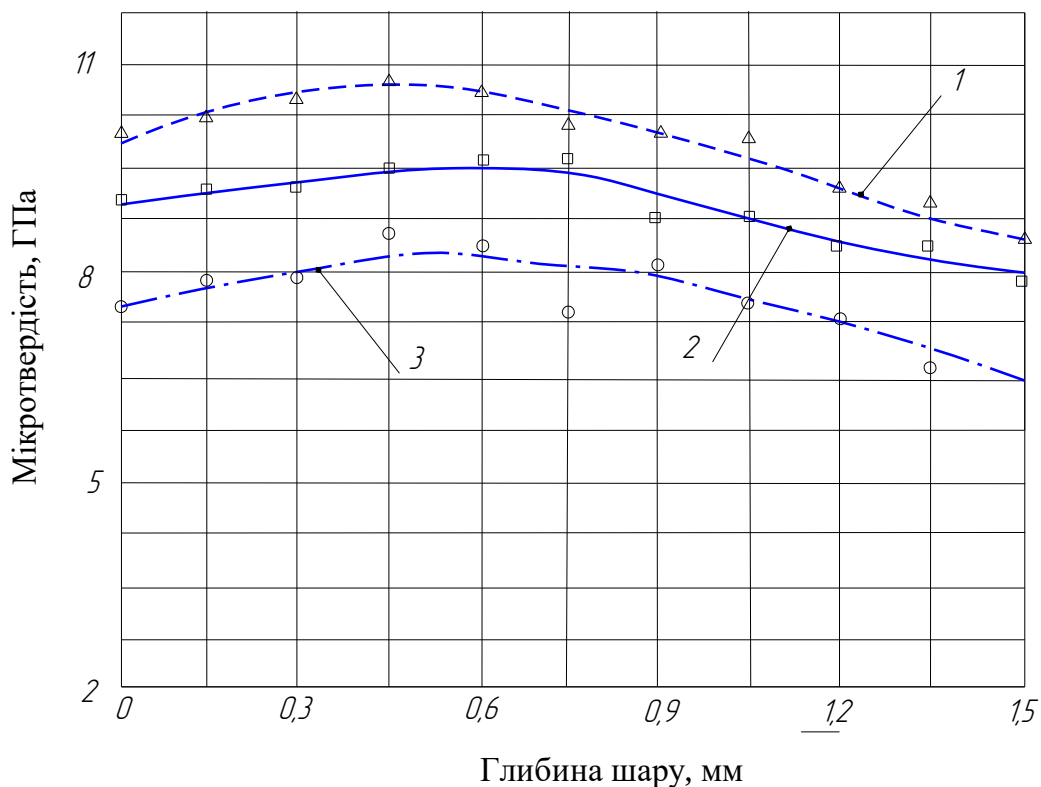
Таблиця 4.2 – Залежність мікротвердості матриці сформованих поверхневих шарів від вмісту наповнювача в композиційній стрічці

Склад композиційної стрічки	Середня мікротвердість матриці, МПа, за вмісту наповнювача, %				
	10	20	30	40	50
Fe-Cr-Ni-Cr ₃ C ₂	4610	5670	6560	6220	5800
Fe-Cr-Ni-TiC	4860	4930	4740	4590	4280

Середня мікротвердість матриці навареної композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ з наповнювачем до 30 % зростає до максимуму, очевидно, за рахунок підрозчинення Cr₃C₂ і насичення матриці вуглецем і тим самим хромом з подальшим утворенням продуктів хімічної взаємодії. Подальше підвищення вмісту наповнювача в сформованих шарах призводить до збільшення пористості зі зниженням мікротвердості.

Середня мікротвердість матриці навареної композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-TiC з наповнювачем вмістом від 20 до 50 % має лінійну залежність спадання. Таке спадання мікротвердості можна пояснити таким самим перебігом процесу, що і для першого варіанта (при складі Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂) – збільшенням пористості, а відсутність її підвищення викликана низькою розчинністю TiC у матриці.

Характерним виявився і розподіл величини середньої мікротвердості за глибиною сформованих шарів композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ залежно від вмісту концентрації наповнювача (рис. 4.9).

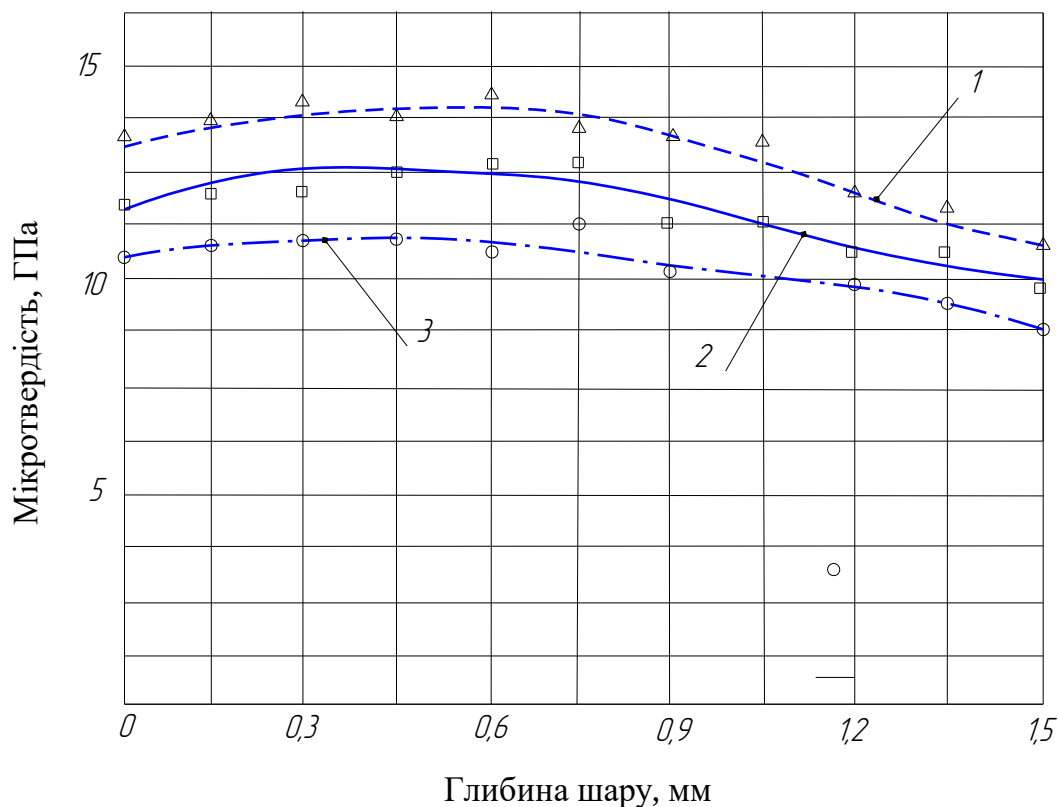


1 – вміст наповнювача 30 %; 2 – вміст наповнювача 20%; 3 – вміст наповнювача 15%

Рисунок 4.9 – Розподіл величини середньої мікротвердості за глибиною шару, сформованого композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂

Розподіл величини середньої мікротвердості за глибиною шарів, сформованих композиційною стрічкою (рис. 4.9), має практично усталений характер. Максимальне значення величини середньої мікротвердості зміщується з поверхні шарів на певну глибину (0,3...0,6 мм).

Дещо вищий розподіл величини середньої мікротвердості за глибиною сформованих шарів має композиційна стрічка складу Fe-Cr-Ni-TiC (рис. 4.10). Як і для попереднього випадку, виявляється практично усталене значення величини середньої мікротвердості. Характерним для цього є плавний перехід значень середньої мікротвердості поверхневих шарів (підвищення мікротвердості від поверхневих шарів у глибину до 0,45 мм) до мікротвердості вглибину композиційної стрічки (подальше зниження мікротвердості від глибини 0,6 мм).



1 – вміст наповнювача 30%; 2 – вміст наповнювача 15%;

3 – вміст наповнювача 10%

Рисунок 4.10 – Розподіл величини середньої мікротвердості за глибиною шару, сформованого композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-TiC

Сформований відновлювальний шар циліндричних поверхонь підп'ятника з композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-TiC має в 1,2...1,3 рази вищі значення величини середньої мікротвердості за глибиною від поверхневого шару порівняно з мікротвердістю шарів, сформованих композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂, що підтверджується вищою твердістю TiC порівняно з твердістю Cr₃C₂.

4.2.3 Пористість поверхневих шарів

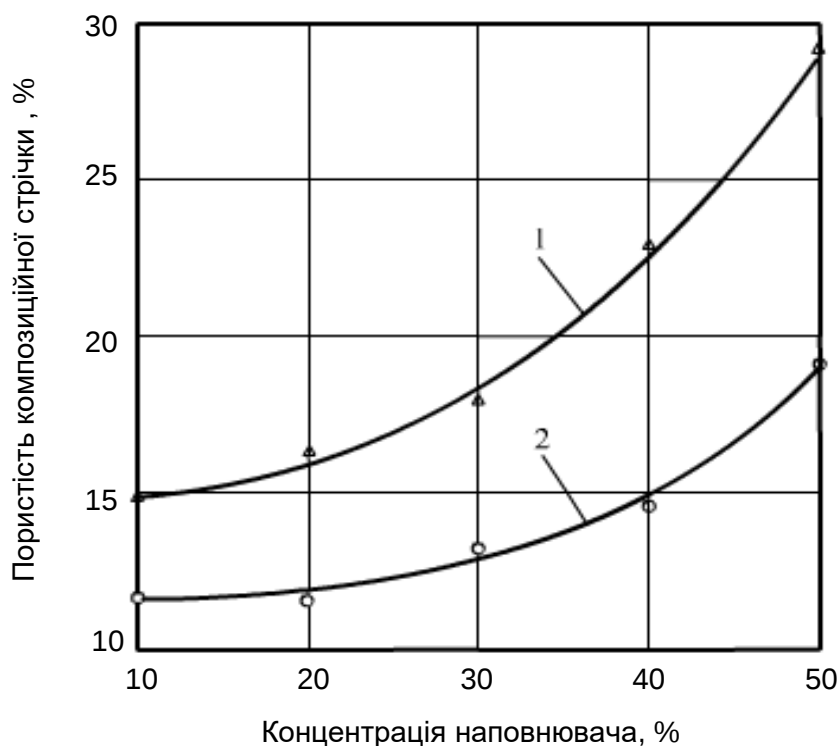
Відомо, що пористість є визначальною ознакою як для забезпечення зносостійкості, так і інших фізико-механічних властивостей порошкових матеріалів, зокрема і композиційних. Вивчення зносостійкості порошкових

матеріалів показало, що будь-яка пористість в матеріалі знижує його зносостійкість [26].

Пористість величиною вище ніж 5% зменшує зносостійкість порошкового матеріалу приблизно на 5...20 %. З подальшим її збільшенням до 20...25 % спостерігається зниження темпу зменшення зносостійкості, а далі – різке зменшення опору матеріалу при механізмі абразивного зносу. Опір матеріалу руйнуванню в мікрооб'ємах змінюється незначно, водночас спостерігається викришування твердого наповнювача за рахунок зменшення площі його контакту з матрицею.

Відомо [26], що головними факторами, які впливають на величину пористості поверхонь, є об'ємний вміст керамічного наповнювача в композиційному матеріалі.

На рис. 4.11 зображено залежності пористості композиційної стрічки від вмісту в ній керамічного наповнювача.



1 – TiC ; 2 – Cr₃C₂

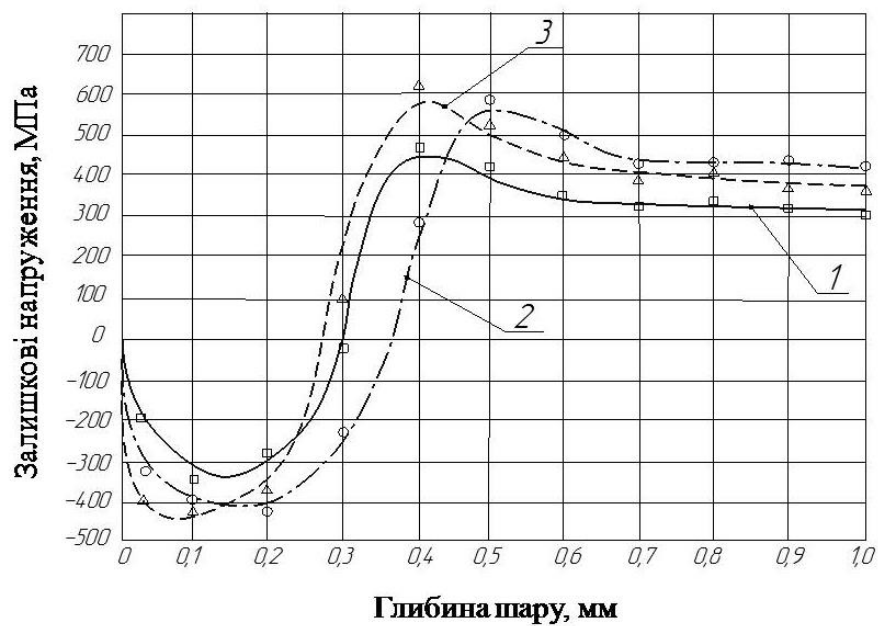
Рисунок 4.11– Залежність пористості наварених композиційних стрічок від концентрації наповнювача

Рис. 4.11 демонструє, що пористість здебільшого визначається концентрацією керамічного наповнювача. Установлено, що збільшення його об'ємного вмісту в стрічці призводить до зростання пористості, особливо інтенсивно це проявляється за вмісту наповнювача понад 40 %. Композиційні стрічки з наповнювачем Cr_3C_2 мають дещо більшу щільність пористості, ніж стрічки, які містять наповнювач TiC . Це можна пояснити відносною близькістю термомеханічних властивостей компонентів матриці та карбіду хрому й значно більшою його розчинністю в компонентах матриці порівняно з карбідом титану.

4.2.4 Внутрішні напруження у сформованому шарі

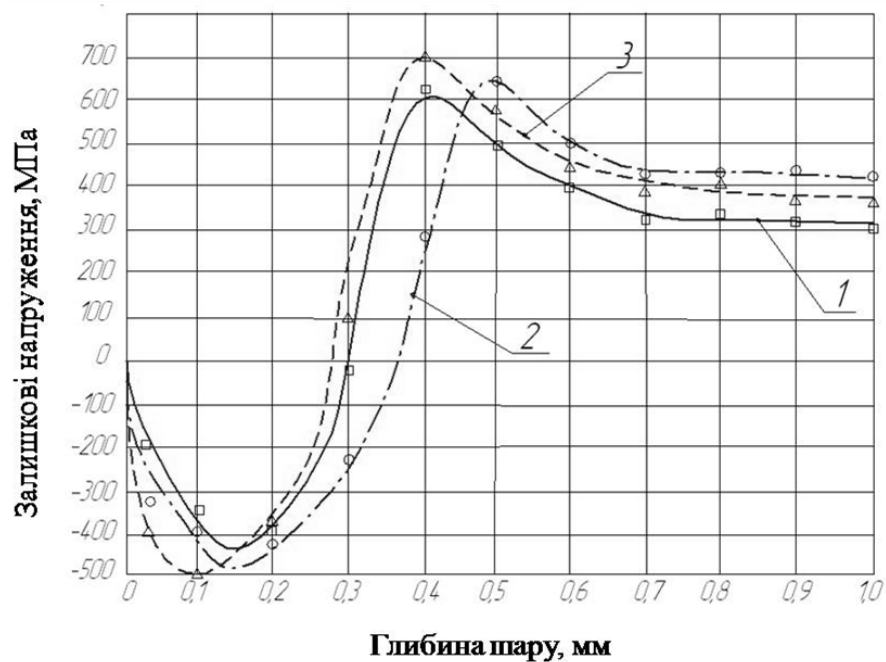
Формування внутрішніх напружень у композиційному матеріалі значно відрізняється від їх формування в традиційних матеріалах через гетерогенність композицій. Їхній знак і величина визначаються певними факторами: складом композиції, різницею коефіцієнтів термічного розширення компонентів композиції і матеріалу основи, рівнем міжфазної взаємодії компонентів сформованого покриття та режимами приварювання стрічки.

Результати виконаних досліджень поля напружень у сформованому шарі композиційних стрічок наведено на рис. 4.12 та 4.13. Із зображених залежностей видно, що в приповерхневих шарах наварених композиційних стрічок обох складів домінують внутрішні напруження стиску. Найімовірніше, це зумовлено, по-перше, тим, що коефіцієнт термічного розширення карбідних фаз менший коефіцієнта матриці, що сприяє виникненню напружень стиску, і, по-друге, позитивною дією деформації стрічок з періодичною проковкою (відповідно до режиму наварювання) з боку роликового електрода зварювальної машини.



1 – вміст наповнювача 10 %; 2 – вміст наповнювача 15 %; 3 – вміст наповнювача 30 %

Рисунок 4.12 – Розподіл залишкових напружень у сформованому шарі в композиційній стрічці складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ за глибиною



1 – вміст наповнювача 10 %; 2 – вміст наповнювача 15 %; 3 – вміст наповнювача 30 %

Рисунок 4.13 – Розподіл залишкових напружень у сформованому шарі в композиційній стрічці складу Fe-Cr-Ni-TiC за глибиною

Внутрішні напруження композиційних стрічок складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ переважно нижчі в 1,1...1,2 раза за внутрішні напруження стрічок складу Fe-Cr-Ni-TiC. Це пояснюється тим, що коефіцієнт термічного розширення карбіду Cr₃C₂ дещо більший за карбід TiC. Структурні особливості композиції суміші Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ мають більш однорідну структуру завдяки вищій міжфазній взаємодії її компонентів, а також дещо меншу пористість, що значно сприяє релаксації внутрішніх напружень і зниженню їх величини.

4.2.5 Міцність зчеплення циліндричної поверхні підп'ятника і композиційної стрічки

Створення надійного металевого зв'язку між підп'ятником та композиційною стрічкою можливе лише в разі дотримання параметрів режимів приварювання, які перебувають у певних допустимих межах. В умовах зварювання двох металів параметри режиму обмежуються двома можливими варіантами:

- можливістю непровару, за якого зона взаємного розплавлення менша за необхідну;
- можливістю викиду металу з піделектродної та міждетальної зон.

Дослідження міцності зчеплення композиційних стрічок з циліндричними поверхнями підп'ятника виконували згідно з вище описаною методикою. Результати досліджень міцності зчеплення стрічок, приварених на зразки зі сталі марки 20ГЛ, наведено в табл. 4.3. Отримані результати (див. табл. 4.3) дають можливість зробити висновок про те, що міцність зчеплення композиційної стрічки двох складів з основним металом достатньо висока. У випадку композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ міцність зчеплення з основним металом на 6,5 % вища порівняно з привареною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-TiC і становить 315,7 МПа.

Таблиця 4.3 – Результати дослідження міцності зчеплення композиційних стрічок, приварених на дослідні зразки зі сталі марки 20ГЛ, МПа

Номер штифта	Композиційна стрічка складу:	
	Fe-Cr-Ni-TiC	Fe-Cr-Ni-Cr ₃ C ₂
1	288	309
2	290	308
3	297	329
4	305	315
5	295	322
6	308	328
7	307	320
8	301	308
9	303	306
10	298	312
Середнє значення	299,2	315,7

4.3 Методика дослідження величини зносу відремонтованої поверхні підп'ятника

4.3.1 Дослідження величини зносу зразків

Для дослідження величини зносу зразків з навареною композиційною стрічкою було використано універсальну машину тертя УМТ-2168, яка призначена для випробування різних фрикційних матеріалів на тертя та знос у широкому діапазоні навантажень і швидкостей.

Машина УМТ-2168 (рис. 4.14) належить до універсальних машин тертя й має вихід на ЕОМ. Великий набір змінних пристроїв дає змогу швидко

переналаштувати машину на різні схеми випробувань. Під час досліджень було використано схему «вал – втулка» для випробувань. Машина складається з таких основних частин: установка випробувальна; камера тертя для випробування зразків; пульт керування.

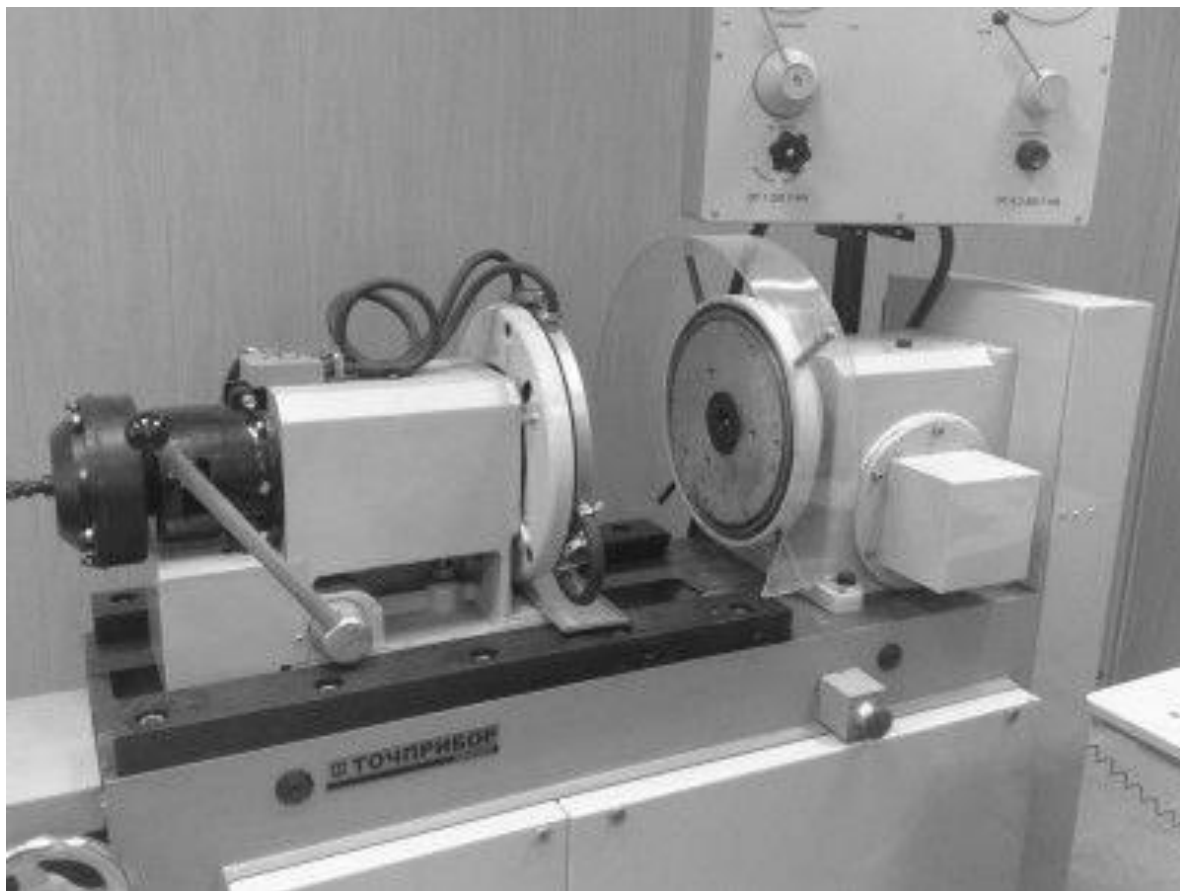


Рисунок 4.14 – Загальний вигляд машини тертя УМТ-2168

Привід машини УМТ-2168 – електромеханічний з плавним регулюванням швидкості. Вимірювач моменту тертя – електромеханічний. Притиск зразків – пневматичний, вимір сили притиску – манометричний. Охолодження – водяне (від водопроводу). Можливе програмування режимів випробувань. Машина встановлюється на віброопорах.

У процесі випробувань вимірювався момент тертя, сила притиску, температура, частота обертання, шлях тертя. Підключення УМТ-2168 до ПК дає можливість реєструвати покази датчиків у процесі виконання випробування в цифровому та графічному вигляді.

У ході досліджень випробовувалися три пари тертя «вал – втулка»:

- втулка зі сталі марки 20ГЛ (базовий варіант);
- втулка з навареною композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-TiC (перша дослідна пара);
- втулка з навареною композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ (друга дослідна пара).

Матеріал втулки у всіх трьох парах тертя – сталь марки 20ГЛ.

4.3.2 Методика стендових досліджень величини зносу підп'ятників

Стендові дослідження величини зносу підп'ятників виконували на випробувальному стенді ІСРБ-1000 (рис. 4.15).



Рисунок 4.15 – Випробувальний стенд ІСРБ-1000

Цей стенд призначений для ресурсних випробувань надресорної балки й бічної рами двовісних візків вантажних вагонів залізничного транспорту колії 1520 мм.

Склад випробувального стенду ІСРБ-1000 такий:

- навантажувальний пристрій, що являє собою жорстку чотириколонну конструкцію з верхнім розташуванням силового гідроциліндра й регульованим робочим простором (два гідроциліндри підйому / опускання траверси);
- насосна установка;
- акумуляторна станція;
- транспортний візок, що являє собою силовий каркас з колісними парами. Випробовувана конструкція надресорної балки під час досліджень розташована на візку;
- шафа керування.

Дослідження величини зносу здійснювали на надресорних балках з відремонтованими підп'ятниками, циліндричні поверхні яких відновлені навареною композиційною стрічкою (двох складів). Також дослідженню підлягали підп'ятники:

- з установленими на них зносостійкими елементами зі сталі марки ЗОХГСА;
- циліндричні поверхні, відновлені автоматичним наплавленням електродом АН-348 під флюсом.

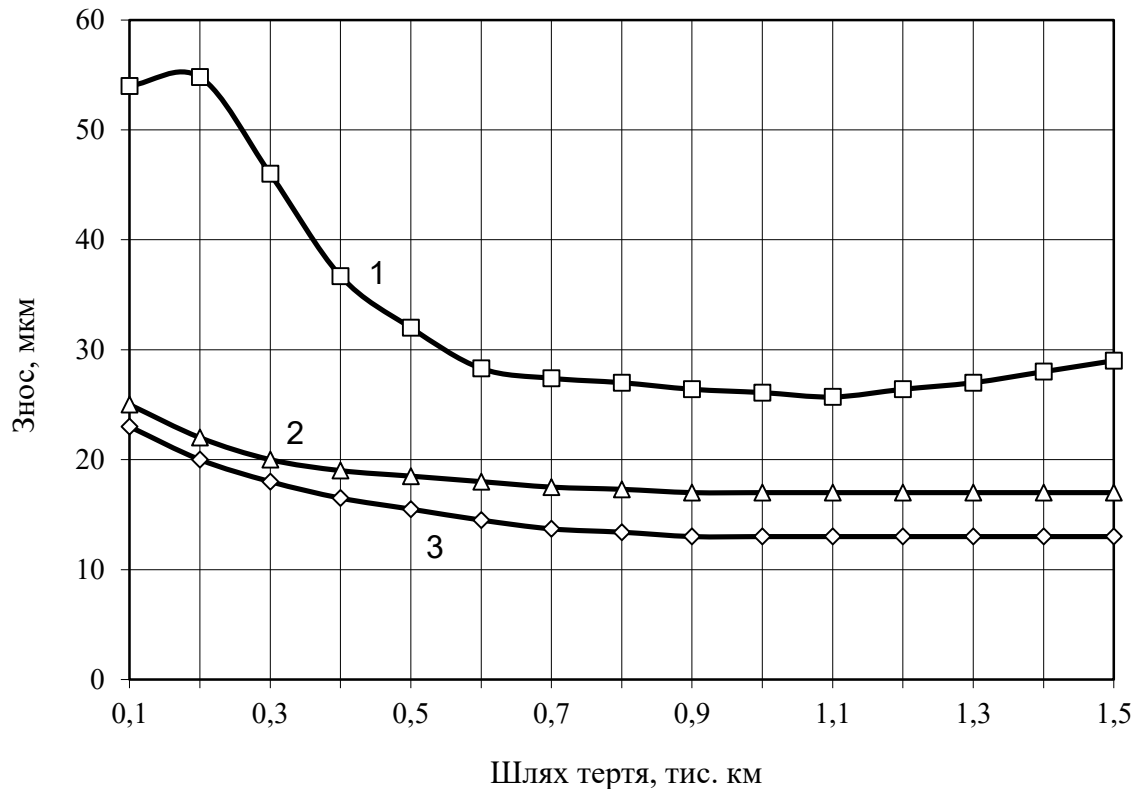
4.4 Результати досліджень величини зносу п'ятникових вузлів

4.4.1 Аналіз величини зносу дослідних зразків

Середні величини зносу втулки на машині тертя УМТ-2168 для трьох дослідних пар тертя залежно від шляху тертя наведено на рис. 4.16.

Залежності величини середнього зносу втулки від шляху тертя (див. рис. 4.16) показують, що для пари тертя базового варіанта ці значення в 1,7...2,7 рази вищі порівняно з дослідними зразками. Різниця величини зносу для дослідних пар тертя становить 8...23 %, причому вищі значення властиві для

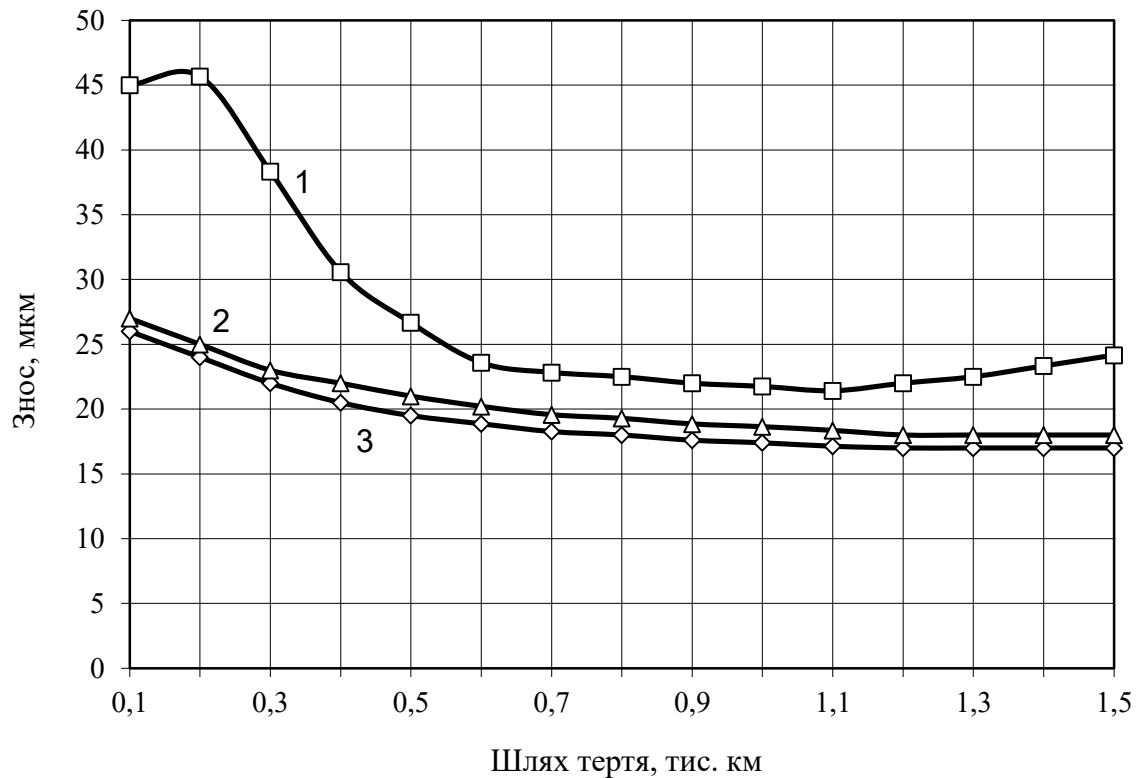
втулки, до якої приварена композиційна стрічка складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂. Крім того, у дослідних парах тертя спостерігається нетривалий процес припрацювання поверхонь, а різниця в зносах від початку досліджень до усталеного процесу зносу становить 8...9 мкм. Для базового варіанта ця величина становить 22...28 мкм, причому має характер поступового підвищення, що відсутнє у дослідних парах тертя.



1 – базовий варіант; 2 – друга дослідна пара; 3 – перша дослідна пара

Рисунок 4.16 – Залежність величини середнього зносу втулки від шляху тертя на машині УМТ-2168 ($P = 4,5$ МПа, $V=0,5$ м/с)

Для адекватності виконаних досліджень наведемо результати середньої величини зносу вала залежно від шляху тертя на машині УМТ-2168 (рис. 4.17) для трьох варіантів випробувань.

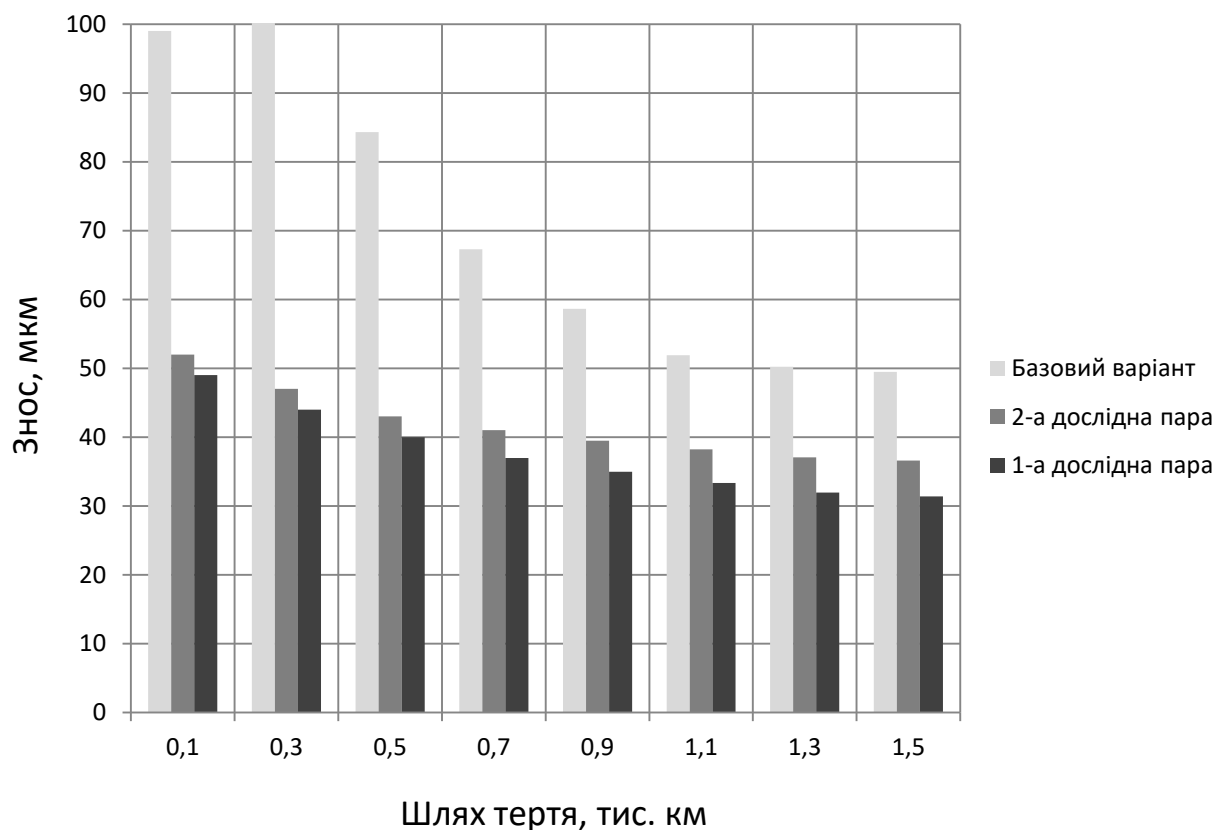


1 – базовий варіант; 2 – друга дослідна пара; 3 – перша дослідна пара

Рисунок 4.17 – Результати залежності середньої величини зносу вала від шляху тертя на машині УМТ-2168 ($P = 4,5$ МПа, $V=0,5$ м/с)

Середня величина зносу вала дослідних пар тертя з навареними композиційними стрічками в 1,15...1,90 рази нижча порівняно зі зносом вала для базового варіанта (див. рис. 4.17), а інтенсивність зносу залишається практично на одному рівні, тобто процес припрацювання відбувається плавно. У базовому варіанті навпаки: різниця величини зносу сягає 24 мкм і має характер постійної зміни (зменшення / збільшення).

Для порівняння середньої величини зносу дослідних пар тертя наведемо залежність сумарного зносу зразків залежно від шляху тертя на машині УМТ-2168 (рис. 4.18). Сумарний знос дослідних пар тертя з навареними композиційними стрічками також у 1,3...2,3 рази нижчий порівняно з базовим варіантом (див. рис. 4.18).



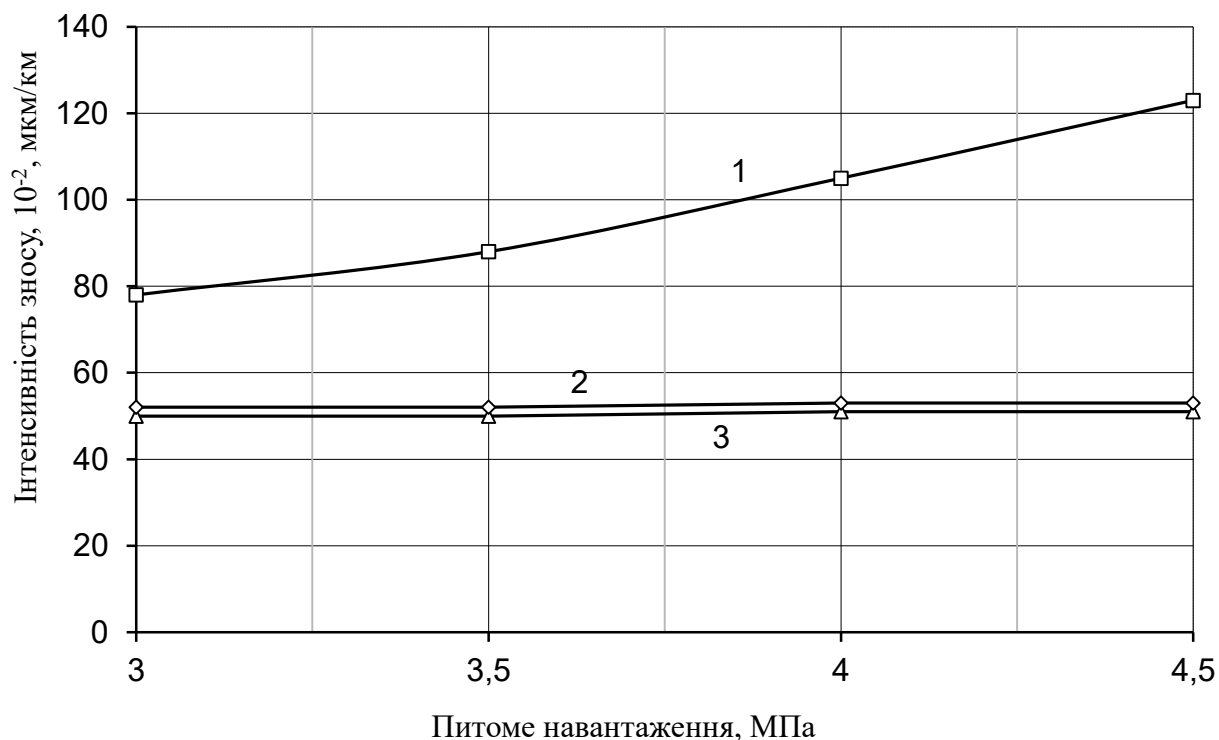
1 – базовий варіант; 2 – друга дослідна пара; 3 – перша дослідна пара

Рисунок 4.18 – Залежність сумарного зносу зразків залежно від шляху тертя на машині УМТ-2168 ($P = 4,5$ МПа, $V=0,5$ м/с)

На рівень зносостійкості приварених композиційних матеріалів впливають певні фактори, основними з яких є твердість матриці та керамічного наповнювача, пористість, об'ємний вміст та розмір керамічного наповнювача, а також фізико-механічні властивості й гранулометричний склад абразивних часток, що потрапляють до п'ятникового вузла під час експлуатації вантажних вагонів.

Інтенсивність зносу дослідних зразків у початковий період напрацювання (до 500 км – 2, 3 позиції; до 1 тис. км – для базового варіанта) дещо більша, ніж у наступні періоди (див. рис. 4.18). Характерним є те, що за певного напрацювання спостерігається стабілізація інтенсивності зносу за геометричними розмірами. Поява цього моменту залежить від швидкісно-навантажувальних умов дослідних зразків, що випробовуються.

Також наведемо результати випробувань дослідних пар тертя залежно від зміни величини навантаження на машині тертя УМТ-2168 зі шляхом тертя в 6 тис. км і швидкістю ковзання 0,5 м/с (рис. 4.19).

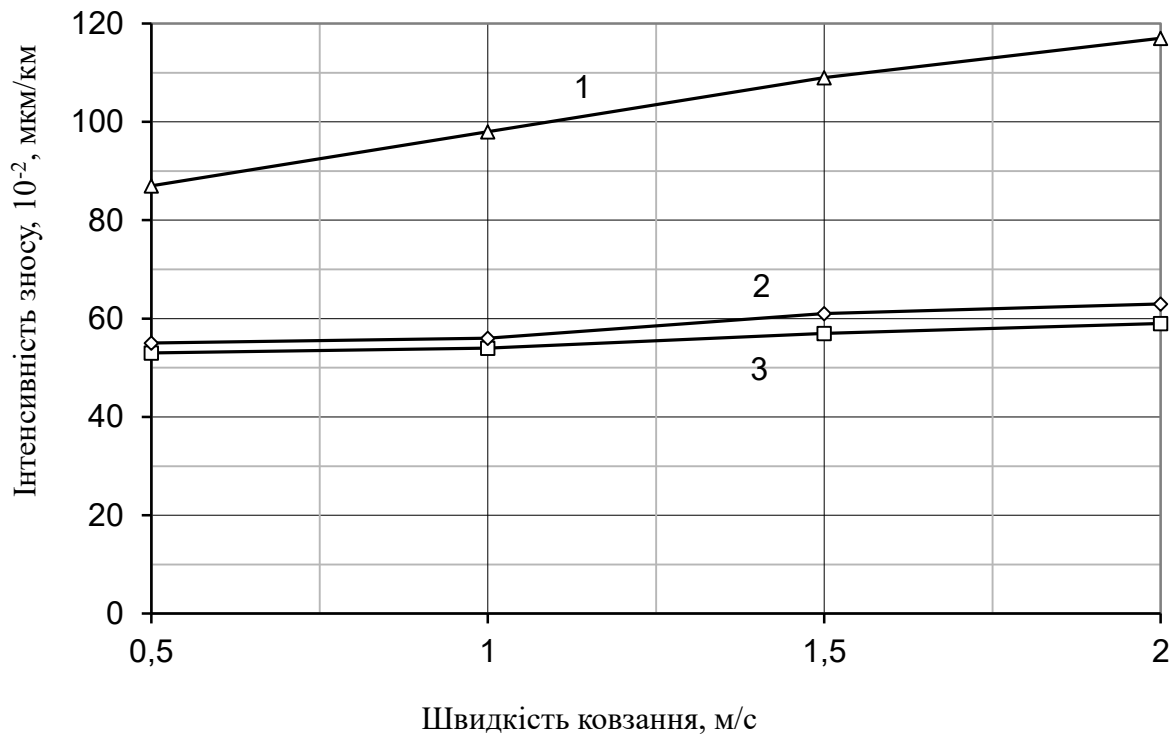


1 – базовий варіант; 2 – друга дослідна пара; 3 – перша дослідна пара

Рисунок 4.19 – Залежності величини інтенсивності зносу втулки від питомого навантаження на машині тертя УМТ-2168 ($V=0,5$ м/с)

Інтенсивність зносу дослідних пар тертя з привареними композиційними стрічками має усталений характер і практично не залежить від зміни величини питомого навантаження (див. рис. 4.19). Для базового варіанта питоме навантаження значно впливає на величину інтенсивності зносу – він збільшується в 1,57 раза.

Крім того, на рис. 4.20 наведено залежності інтенсивності зносу втулок від зміни швидкості ковзання в парах тертя на машині УМТ-2168 із сумарним шляхом тертя 5 тис. км і питомим навантаженням 4,5 МПа для дослідних зразків.



1 – базовий варіант; 2 – друга дослідна пара; 3 – перша дослідна пара

Рисунок 4.20 – Залежності інтенсивності зносу втулок від зміни швидкості ковзання в парах тертя на машині УМТ-2168 ($P=4,5$ МПа)

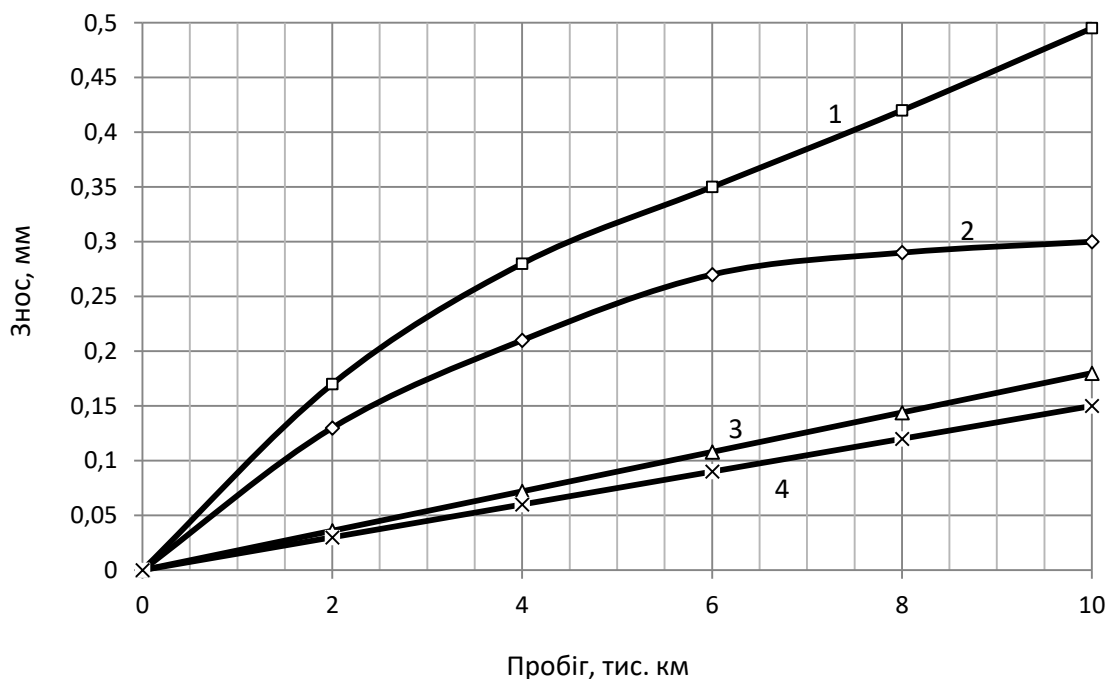
Можна переконатися, що залежно від зміни (підвищення) швидкості ковзання найменшу зносостійкість мають зразки базового варіанта порівняно з втулками з навареними композиційними стрічками (див. рис. 4.20). При цьому інтенсивність зносу збільшується в 1,34 раза. Зміна величини швидкості ковзання майже не приводить до зміни інтенсивності зносу для дослідних зразків з навареною композиційною стрічкою.

Оскільки результати досліджень пари тертя «вал – втулка» підтверджують доцільність запропонованих технологічних рішень щодо відновлення поверхонь підп'ятника наварюванням композиційних стрічок, то далі опишемо результати стендових досліджень п'ятникового вузла.

4.4.2 Стендові випробовування п'ятникових вузлів

Для встановлення відповідного рівня міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів були виконані дослідження на стенді ІСРБ-1000 з подальшим визначенням величин зносу відремонтованих підп'ятників. При цьому швидко-навантажувальний режим був наближений до експлуатаційних умов за умови повного завантаження вантажного вагона у складі з 60 одиниць і в порожньому стані (від дії маси тари).

На рис. 4.21 наведено експериментальні залежності величини зносу циліндричної поверхні підп'ятника надресорної балки під час взаємодії з п'ятником залежно від пробігу з моделюванням випадку повного завантаження вантажного вагона (23,5 т/вісь) у складі поїзда з 60 одиниць.

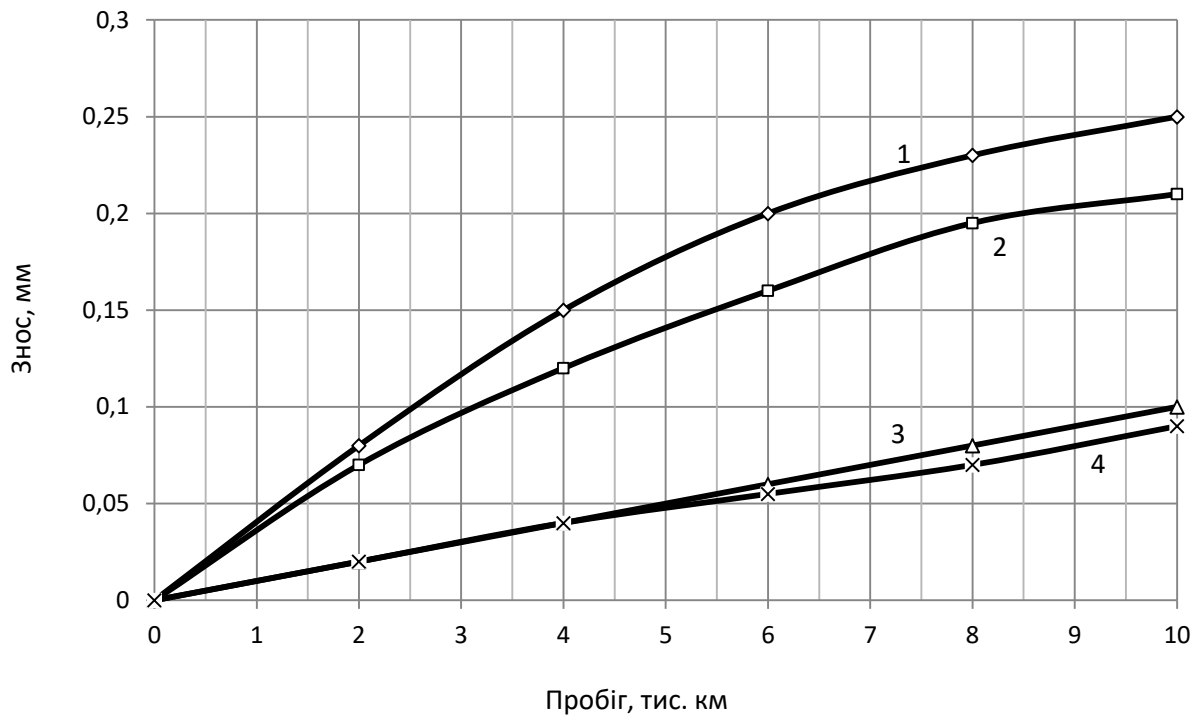


1 – ремонт автоматичним наплавленням електродом АН-348 під шаром флюсу; 2 – ремонт установленими зносостійкими елементами зі сталі марки 3ОХГСА; 3 – ремонт навареною композиційною стрічкою складу $\text{Fe-Cr-Ni-Cr}_3\text{C}_2$; 4 – ремонт навареною композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-TiC

Рисунок 4.21 – Експериментальні залежності величини зносу циліндричної поверхні підп'ятника надресорної балки під час взаємодії з п'ятником від пробігу з моделюванням випадку повного завантаження вантажного вагона

Залежності, зображені на рис. 4.21, вказують, що найбільшу величину зносу мають підп'ятники, відремонтовані автоматичним наплавленням електродом АН-348 під шаром флюсу (величина зносу становить 0,5 мм на 10 тис. км пробігу). Варто звернути увагу на поліпшені зносостійкі властивості елементів зі сталі марки ЗОХГСА, що мають величину зносу нижчу в 1,31...1,65 раза порівняно з попередньо розглянутим підп'ятником, відремонтованим за допомогою наплавлення. У обох розглянутих випадках спостерігається процес припрацювання контактних поверхонь: до 6 тис. км – для підп'ятників зі зносостійкими елементами зі сталі марки ЗОХГСА і понад 10 тис. км – для підп'ятників, відремонтованих способом автоматичного наплавлення електродом АН-348 під шаром флюсу. Величина зносу відремонтованих підп'ятників з навареними композиційними стрічками у двох випадках (криві 3, 4, рис. 4.21) має постійне значення зі збільшенням напруцювання, тобто процес припрацювання відсутній. Значення величини зносу поверхні підп'ятника, відремонтованого способом наварення композиційних стрічок менше в 2,7...5,6 раза порівняно з величиною зносу підп'ятників, відремонтованих за допомогою наплавлення, і в 1,6...4,3 раза нижче порівняно з величиною зносу підп'ятників з установленими зносостійкими елементами.

Експериментальні залежності величини зносу циліндричної поверхні підп'ятника надресорної балки під час взаємодії з п'ятником від пробігу з моделюванням випадку порожнього пробігу вантажного вагона в складі поїзда з 60 одиниць наведено на рис. 4.22.

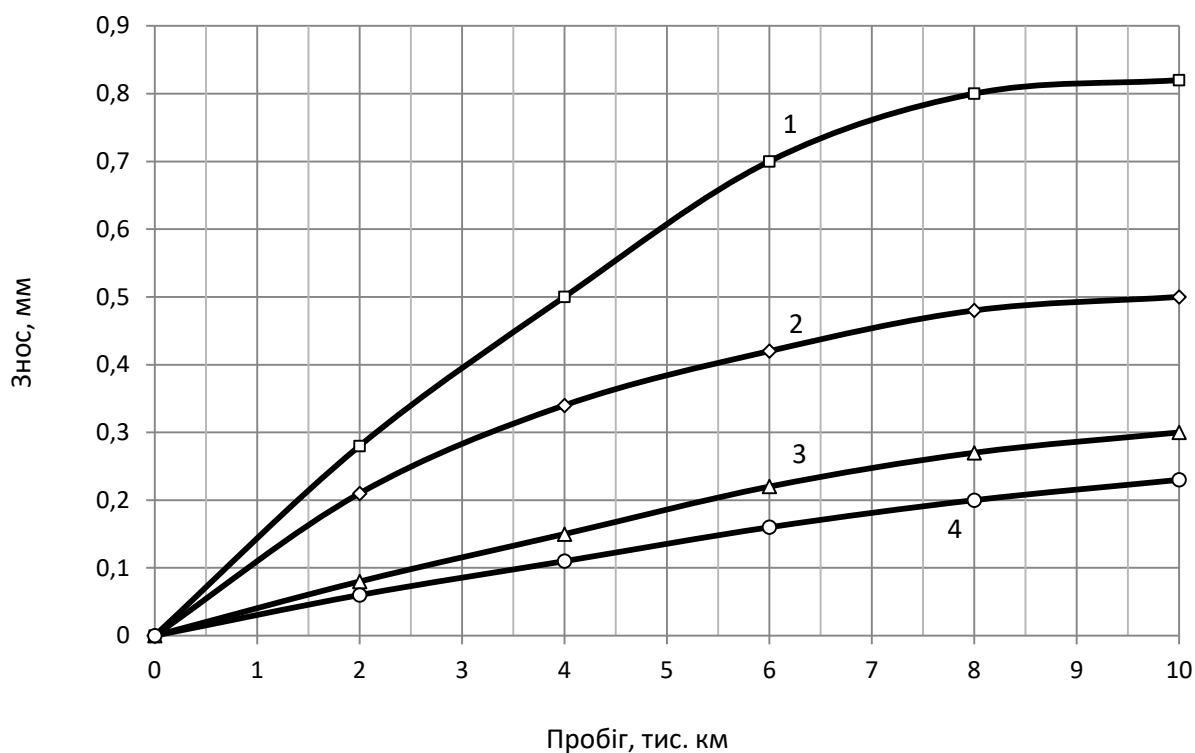


1 – ремонт автоматичним наплавленням електродом АН-348 під шаром флюсу; 2 – ремонт установленими зносостійкими елементами зі сталі марки 30ХГСА; 3 – ремонт навареною композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂; 4 – ремонт навареною композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-TiC
 Рисунок 4.22 – Експериментальні залежності величини зносу циліндричної поверхні підп'ятника надресорної балки під час взаємодії з п'ятником від пробігу з моделюванням випадку повного завантаження вантажного вагона

У разі моделювання випадку порожнього пробігу вантажного вагона (див. рис. 4.22) величина зносу циліндричної поверхні підп'ятника надресорної балки під час взаємодії з п'ятником залежно від пробігу має в 1,4...2,1 раза нижчі значення, ніж за повного завантаження. Аналогічна тенденція спостерігається щодо зміни величини зносу залежно від пробігу, але різниця в значеннях є дещо нижчою. Так, величина зносу відремонтованої поверхні підп'ятника з навареними композиційними стрічками менша в 2,8...4,0 раза порівняно з величиною зносу підп'ятників, відремонтованих за допомогою наплавлення, і в 2,1...3,5 раза нижче порівняно з величиною зносу підп'ятників зі зносостійкими елементами. Зі свого боку, величина зносу

підп'ятників з установленими зносостійкими елементами нижча в 1,14...1,25 рази порівняно з підп'ятниками, відремонтованими за допомогою наплавлення.

Для відтворення картини сумісного зносу п'ятникового вузла під час випробувань фіксувався і знос п'ятника. Тому на рис. 4.23 наведено залежності сумарного зносу п'ятникового вузла вантажного вагона від пробігу для випадку повного завантаження й у складі завантаженого поїзда.



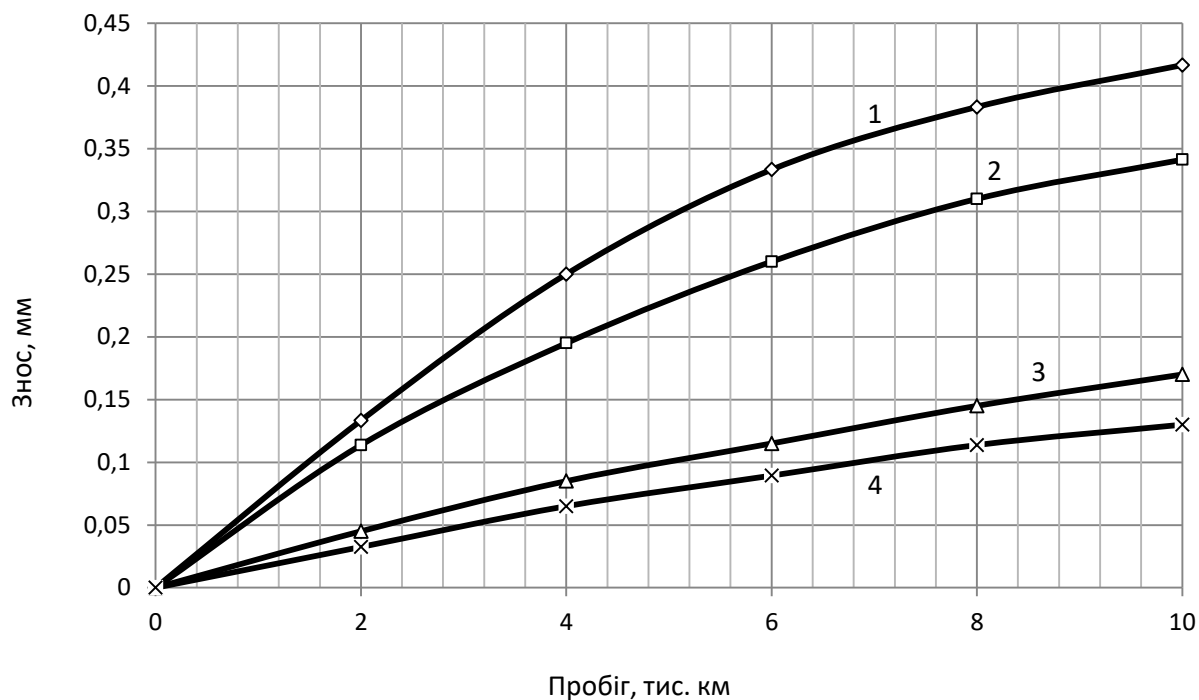
1 – ремонт автоматичним наплавленням електродом АН-348 під шаром флюсу; 2 – ремонт установленими зносостійкими елементами зі сталі марки ЗОХГСА; 3 – ремонт навареною композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-Cr3C2; 4 – ремонт навареною композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-TiC

Рисунок 4.23 – Залежності сумарної величини зносу п'ятникового вузла від пробігу для випадку повного завантаження вантажного вагона

З наведених залежностей (див. рис. 4.23) видно, що процес припрацювання в п'ятниковому вузлі зі всіма відремонтованими підп'ятниками триває до 8 тис. км, на що вказують сумарні величини зносу

сполучених поверхонь. Сумарні величини зносу п'ятникового вузла в разі повного завантаження вантажного вагона залежно від пробігу вказують на те, що найбільшу сумарну величину зносу мають вузли з підп'ятниками, відремонтованими автоматичним наплавленням під шаром флюсу (0,82 мм на 10 тис. км пробігу). Менші значення сумарного зносу мають п'ятникові вузли з підп'ятниками зі зносостійкими елементами – 0,5 мм на 10 тис. км пробігу. При цьому сумарна величина їхнього зносу нижча в 1,33...1,67 раза порівняно з вузлом з підп'ятниками, відремонтованими автоматичним наплавленням. Значення сумарної величини зносу поверхонь п'ятникового вузла з підп'ятниками, відремонтованими навареними композиційними стрічками, є меншим у 2,7...4,7 раза порівняно з величиною сумарного зносу вузлів з підп'ятниками, відремонтованими за допомогою наплавлення, і в 1,6...3,5 раза нижча порівняно з вузлами з підп'ятниками, у які встановлені зносостійкі елементи.

На рис. 4.24 наведено величини сумарного зносу п'ятникового вузла вантажного вагона залежно від пробігу для випадку порожнього вагона у складі поїзда. Для всіх наведених випадків (див. рис. 4.24) характерні плавні залежності підвищення величини сумарного зносу п'ятникового вузла. При цьому величина сумарного зносу сполучених поверхонь п'ятникового вузла залежно від пробігу є нижчою в 1,41...2,15 раза, ніж за повного завантаження. Величина сумарного зносу сполучених поверхонь п'ятникового вузла з підп'ятниками, відремонтованими способом наварення композиційних стрічок, менша в 2,4...4,3 раза порівняно з величиною сумарного зносу сполучених поверхонь п'ятникового вузла з підп'ятниками, що відремонтовані наплавленням, і в 2,0...3,7 раза нижче для п'ятникового вузла з підп'ятниками зі зносостійкими елементами. Сумарна величина зносу сполучених поверхонь п'ятникового вузла з підп'ятниками з установленими зносостійкими елементами нижча в 1,18...1,28 раза порівняно з величиною сумарного зносу сполучених поверхонь п'ятникового вузла з підп'ятниками, що відремонтовані наплавленням.



1 – ремонт автоматичним наплавленням електродом АН-348 під шаром флюсу; 2 – ремонт установленими зносостійкими елементами зі сталі марки 3ОХГСА; 3 – ремонт навареною композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂; 4 – ремонт навареною композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-TiC

Рисунок 4.24 – Сумарна величина зносу п'ятникового вузла залежно від пробігу для випадку порожнього вантажного вагона

Висновки до розділу 4

Виконані експериментальні дослідження взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла дають можливість зробити такі висновки:

1. Дослідження структури, елементного складу й фізико-механічних властивостей наварених композиційних стрічок складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ та Fe-Cr-Ni-TiC показали, що компоненти стрічок після наварювання рівномірно розподілені по структурі. Для нікелю характерна висока дифузійна активність завдяки його ультрадисперсній структурі, а хром і залізо мають звичайну структуру. Установлено, що мікротвердість матриці лежить у проєктних

межах і забезпечує працездатність навареної композиційної стрічки в умовах механізму абразивного зносу. Наварена композиційна стрічка, армована приблизно на 60 % карбідом хрому, має мікротвердість 6000...8000 МПа, що вказує на наявність у ній загартованих структур, а також продуктів хімічної взаємодії матричного хрому з вуглецем порошку заліза. Мікротвердість поверхневого шару навареної стрічки, яка армована TiC, є диференційованою, що вказує на наявність незначної кількості продуктів хімічної взаємодії компонентів, а мікротвердість сформованої матриці становить 3000...7000 МПа. Відновлювальний шар циліндричних поверхонь підп'ятника, сформований композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-TiC, має в 1,2...1,3 раза вищі значення середньої мікротвердості у глибині шару порівняно з мікротвердістю шарів, сформованих композиційною стрічкою складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂. Це пов'язано з вищою твердістю TiC порівняно з твердістю Cr₃C₂.

Також досліджено пористість сформованих шарів, яка визначається концентрацією керамічного наповнювача. Установлено, що збільшення його об'ємного вмісту в стрічці призводить до зростання пористості. Композиційні стрічки з наповнювачем Cr₃C₂ мають більшу на 3...8 % щільність пористості, ніж стрічки, які містять наповнювач TiC.

Крім того, досліджено величини внутрішніх напружень композиційних стрічок і міцність їх зчеплення з основним металом, значення яких повною мірою підтверджують можливість їх використання у п'ятниковому вузлі вантажних вагонів.

2. Виконані випробування трьох пар дослідних зразків «вал – втулка» на машині тертя УМТ-2168 показали, що величина та інтенсивність зносу залежно від шляху тертя в зразків з навареними композиційними стрічками нижча в 1,7...2,7 раза порівняно з базовим варіантом. Величина сумарного зносу дослідних пар тертя з навареними композиційними стрічками також у 1,3...2,3 раза нижче за цю саму величину для базового варіанта. Також наведено залежності інтенсивності зносу зразків від зміни величин питомого навантаження й швидкості ковзання. Отримані результати досліджень пари

тертя «вал – втулка» підтвердили доцільність запропонованих технологічних рішень, спрямованих на відновлення поверхонь підп'ятника наварюванням композиційних стрічок, їх ефективність і можливість підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажного вагона.

3. Стендові дослідження дали можливість установити відповідний рівень міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів. Так, у разі моделювання випадку повного завантаження вантажного вагона (23,5 т/вісь) у складі поїзда з 60 одиниць величина зносу циліндричної поверхні підп'ятника надресорної балки становить 0,5 мм на 10 тис. км пробігу. Величина зносу відремонтованих підп'ятників з привареними композиційними стрічками (для двох випадків) менша в 2,7...5,6 раза порівняно з величиною зносу підп'ятників, відремонтованих за допомогою наплавлення, і в 1,6...4,3 раза нижче порівняно з величиною зносу підп'ятників з установленими зносостійкими елементами. Сумарні величини зносу п'ятникового вузла залежно від пробігу за повного завантаження вантажного вагона з підп'ятниками, відремонтованими способом автоматичного наплавлення під шаром флюсу, становлять 0,82 мм на 10 тис. км пробігу; з підп'ятниками зі зносостійкими елементами – 0,5 мм на 10 тис. км пробігу. Сумарна величина зносу поверхонь п'ятникового вузла з підп'ятниками, відремонтованими навареними композиційними стрічками, у 2,7...4,7 раза менша порівняно з величиною сумарного зносу вузлів з підп'ятниками, відремонтованими за допомогою наплавлення, і в 1,6...3,5 раза нижче порівняно з величиною сумарного зносу п'ятникових вузлів з підп'ятниками, в які встановлено зносостійкі елементи.

Також моделювався випадок порожнього пробігу вантажного вагона в складі поїзда. Величина зносу циліндричної поверхні підп'ятника надресорної балки залежно від пробігу при цьому має нижчі в 1,4...2,1 раза значення ніж за повного завантаження. Величина зносу поверхні підп'ятника, відремонтованої навареними композиційними стрічками, менша в 2,8...4,0 раза порівняно з величиною зносу підп'ятників, відремонтованих за

допомогою наплавлення, і в 2,1...3,5 рази нижче порівняно з величиною зносу підп'ятників з установленими зносостійкими елементами. Величина сумарного зносу сполучених поверхонь п'ятникового вузла залежно від пробігу порожнього вагона має в 1,41...2,15 рази нижчі значення, ніж за повного завантаження. Величина сумарного зносу сполучених поверхонь п'ятникового вузла з підп'ятниками, відремонтованими навареними композиційними стрічками, менша в 2,4...4,3 рази порівняно із цією самою величиною для підп'ятників, що відремонтовані наплавленням, і в 2,0...3,7 рази нижче за сумарний знос сполучених поверхонь з підп'ятниками з установленими зносостійкими елементами.

РОЗДІЛ 5 ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЖРЕМОНТНОГО РЕСУРСУ П'ЯТНИКОВИХ ВУЗЛІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ

5.1 Методика експлуатаційних досліджень

Експлуатаційні дослідження міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів – це випробуваннями на надійність вантажних вагонів, які пов'язані зі значними фінансовими витратами, тому планування випробувань повинно передбачати визначення обсягу вибірки [32,49] і критеріїв завершення випробувань, виходячи із заданої точності й достовірності їхніх результатів. Формування вибірки відбувається таким чином, щоб результати її випробувань могли бути поширені на сукупність систем або засобів [46].

Методи планування розміру вибірки базуються на припущенні, що до закінчення спостереження буде можливо підтвердити або спростувати наявність передбачуваних відмінностей між досліджуваними групами. Шанс виявлення статистично значущих відмінностей залежить від розміру вибірки і величини істинної відмінності порівнюваних показників. Якщо в дослідження включено невелику кількість вагонів і при цьому не виявлено ефект, то постає питання, із чим це пов'язано – з недостатністю даних або, дійсно, відсутня різниця. З іншого боку, невиправдане збільшення розміру вибірки неефективно з позиції фінансових, трудових і організаційних витрат [46].

Випробування необхідно виконувати для тих самих умов експлуатації, для яких в технічній документації встановлені показники надійності для вантажних вагонів. Під час випробувань здійснюють технічне обслуговування, періодичні комісійні огляди, вимір або замір параметрів, що визначають ресурсний стан п'ятникового вузла вантажних вагонів.

Крім розрахункових і експериментальних методів оцінки показників надійності вагонів використовують і розрахунково-експериментальні методи. Їх застосовують, якщо з технічних, економічних і організаційних причин неможливо або недоцільно застосовувати експериментальні методи, наприклад для систем, які не можна випробовувати в повному обсязі (наприклад, встановлення загального значення ресурсу вантажного вагона).

Випробування здійснюють за певною програмою-методикою випробувань, що є їх організаційно-методичними засадами. Програма-методика встановлює план випробувань, методи обробки даних, правила прийняття рішень. План випробувань на надійність встановлює кількість об'єктів випробувань, порядок виконання випробувань (з відновленням працездатного стану об'єкта після відмови, заміною об'єкта, що відмовив, або без відновлення й заміни) і критерії їх припинення [46].

Формуючи плани визначальних випробувань, найменування плану прийнято позначати трьома буквами (цифрами) [32,46]. Перша з них позначає кількість випробовуваних систем, друга – наявність R або відсутність U відновлень на час випробувань у разі відмови, третя – критерій припинення випробувань. У роботі для експлуатаційних досліджень використано план $[NRr]$.

На рис. 5.1 наведено схему плану $[NRr]$ – системи вантажного вагона, що відмовили під час випробувань, відновлюють або замінюють новими [32,46], а випробування припиняють, коли сумарна за всіма позиціями кількість відмов систем досягає r . Завданням формування планування є визначення мінімального обсягу спостережень – вибір кількості випробовуваних об'єктів N , а також мінімальної кількості відмов r для плану $[NRr]$.

Прийняття рішень здійснювали за певними правилами, які з математичної позиції є характеристичними функціями від результатів і планів контролю.

План $[NRr]$ обрано, виходячи з міркувань, що п'ятникові вузли будуть відновлюватися при деповському ремонті чи раніше й дослідження будуть виконуватися для декількох варіантів відновлених поверхонь.

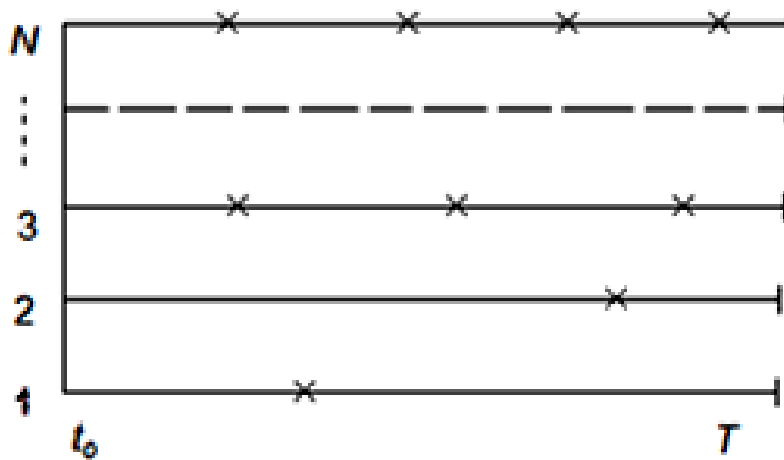


Рисунок 5.1 – План випробувань $[NRr]$

Експлуатаційні випробування здійснювали на піввагонах моделі 12-7023 на візках моделі 18-7020. На 8 дослідних піввагонах були встановлені візки з п'ятниками, відремонтованими навареною композиційною стрічкою (на 4 вагонах – поверхні підп'ятників відновлені стрічкою $\text{Fe-Cr-Ni-Cr}_3\text{C}_2$, а на інших – стрічкою Fe-Cr-Ni-TiC). Приблизно через 120-130 тис. км пробігу піввагонів здійснювали їх підняття з викочуванням візків та подальшим обміром діаметрів циліндричних поверхонь п'ятникових вузлів. Така періодичність зумовлена кратністю міжремонтного періоду, що встановлений для цієї моделі піввагона, – 250 тис. км між деповськими ремонтами.

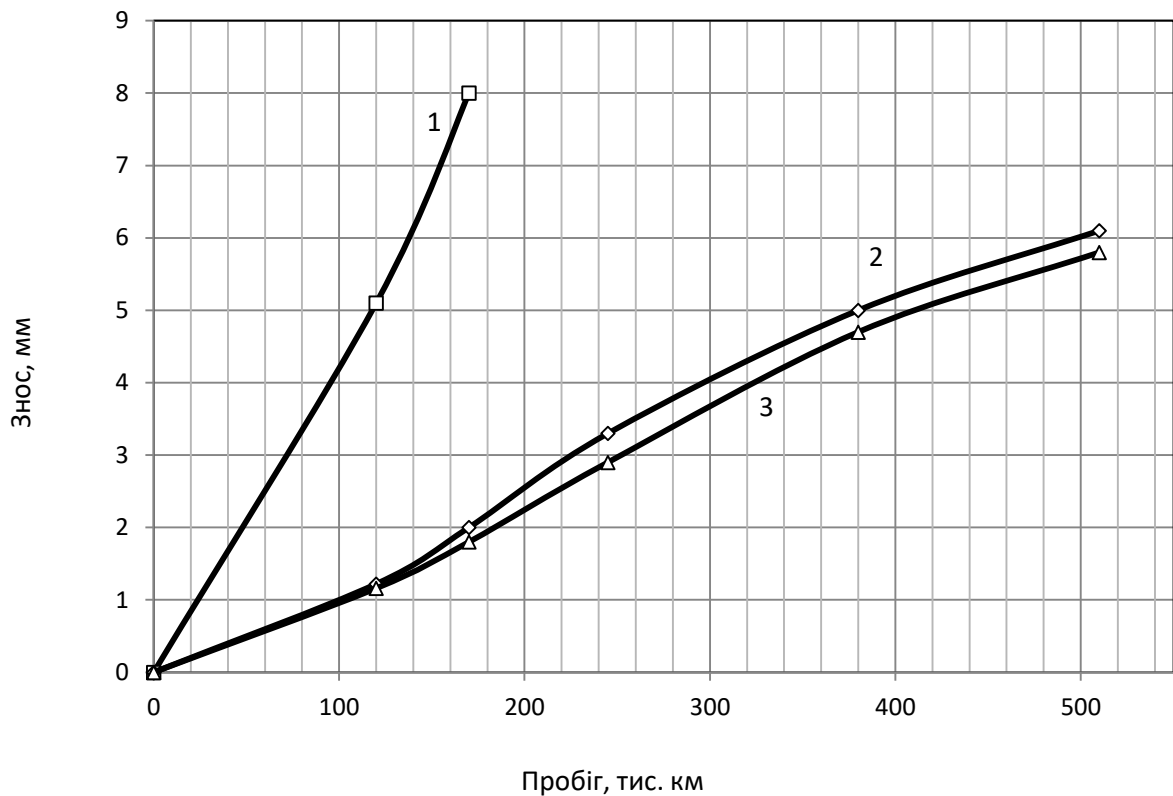
Знос циліндричних поверхонь п'ятникових вузлів визначався різницею між початковим і вимірним значенням діаметра за модулем як п'ятника, так і підп'ятника.

Метою випробувань було визначення інтенсивності експлуатаційних зносів п'ятникових вузлів і, відповідно, визначення міжремонтного ресурсу вантажних вагонів за станом зносу.

5.2 Експлуатаційні дослідження стану зносу під'ятникового вузла

Як зазначалося раніше, головним завданням було забезпечення рівномірного зносу за діаметром під'ятника, оскільки вони потребують передчасного ремонту через підвищений знос вздовж осі у поздовжньому напрямку вантажного вагона. Застосування під час ремонту наплавлення електродами під шаром флюсу, а також зносостійкі вставки забезпечують міжремонтний пробіг 160...250 тис. км, що відповідає 2 рокам експлуатації залежно від моделі вагона. Тому для вирівнювання величини зносу під'ятника у всіх напрямках було теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено застосування контактного наварювання композиційних стрічок з дискретною твердістю та зносостійкістю, а також застосування змінної товщини власне композиційної стрічки.

Результати експлуатаційних досліджень стану зносу під'ятників надресорних балок піввагонів моделі 12-7023, які були відремонтовані, наведено на рис. 5.2. Дослідження виконувалися протягом 4 років.



1 – наплавлення під шаром флюсу; 2 – наварювання композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂; 3 – наварювання композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-TiC

Рисунок 5.2 – Величина зносу відновлених підп'ятників надресорних балок піввагонів моделі 12-7023 залежно від пробігу з коефіцієнтом використання пробігу 0,5

Наведені залежності величини зносу підп'ятників надресорних балок піввагонів моделі 12-7023 залежно від пробігу (див. рис. 5.2) свідчать про те, що підп'ятники, відновлені наплавленням під шаром флюсу, за станом зносу потребують нового ремонту вже на пробігу 160...180 тис. км. Поверхні підп'ятника, відновлені наварюванням композиційних стрічок складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ і Fe-Cr-Ni-TiC, за станом зносу не потребували передчасного ремонту. Крім того, величина зносу при пробігу 510 тис. км становить 5,8...6,1 мм.

Варто зауважити, що завдання із забезпечення рівномірного зносу за діаметром підп'ятника виконане. Так, циліндричні поверхні підп'ятника, що

відновлені наварюванням композиційних стрічок складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ і Fe-Cr-Ni-TiC, мали рівномірно розподілений знос як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках, а підп'ятники, відремонтовані наплавленням електродами під шаром флюсу, мали діаметр, по якому визначали міжремонтний ресурс вздовж осі піввагона, тоді як у поперечному напрямку знос був у 1,2...2 рази нижчий. Для прогнозування міжремонтного ресурсу за допустимим зносом діаметрів підп'ятника побудуємо апроксимуючі лінії (рис. 5.3).

З рис. 5.3 бачимо, що ремонт підп'ятника за станом зносу необхідно виконувати за пробігу 660 тис. км для першого випадку та 680 тис. км – для другого випадку.

Наведемо результати величини зносу п'ятника для досліджуваних піввагонів на рис. 5.4.

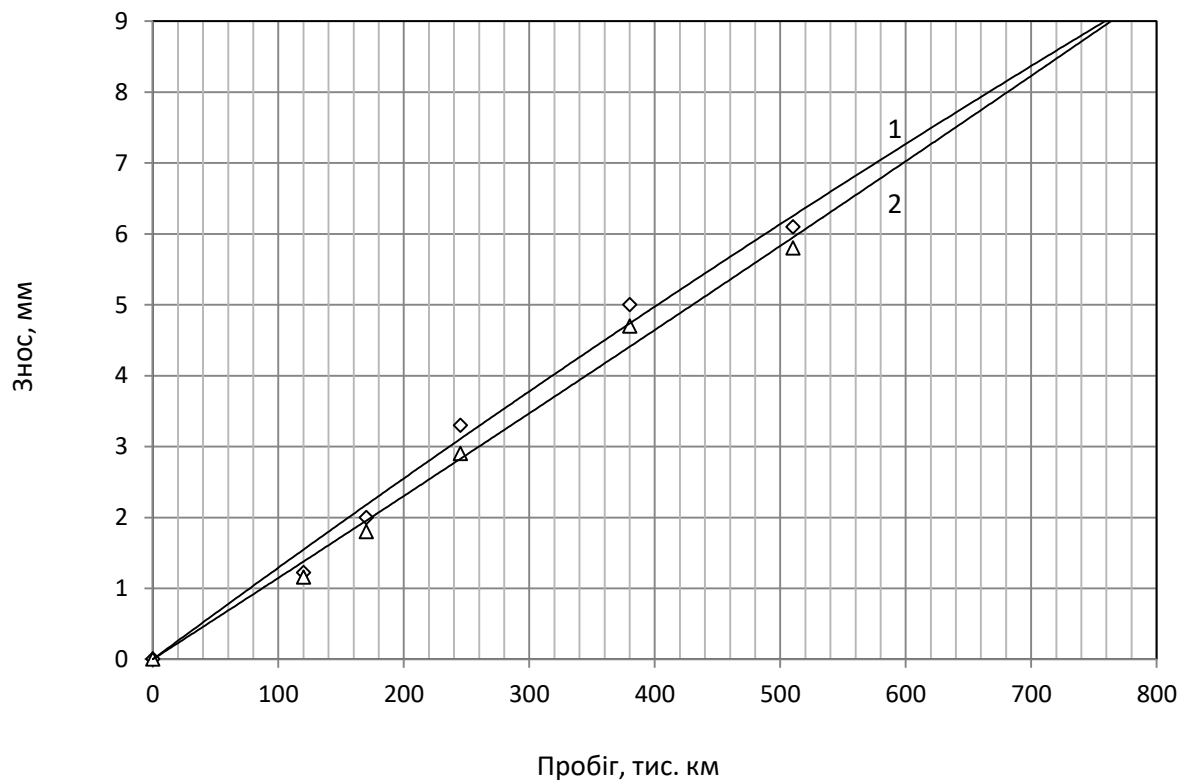
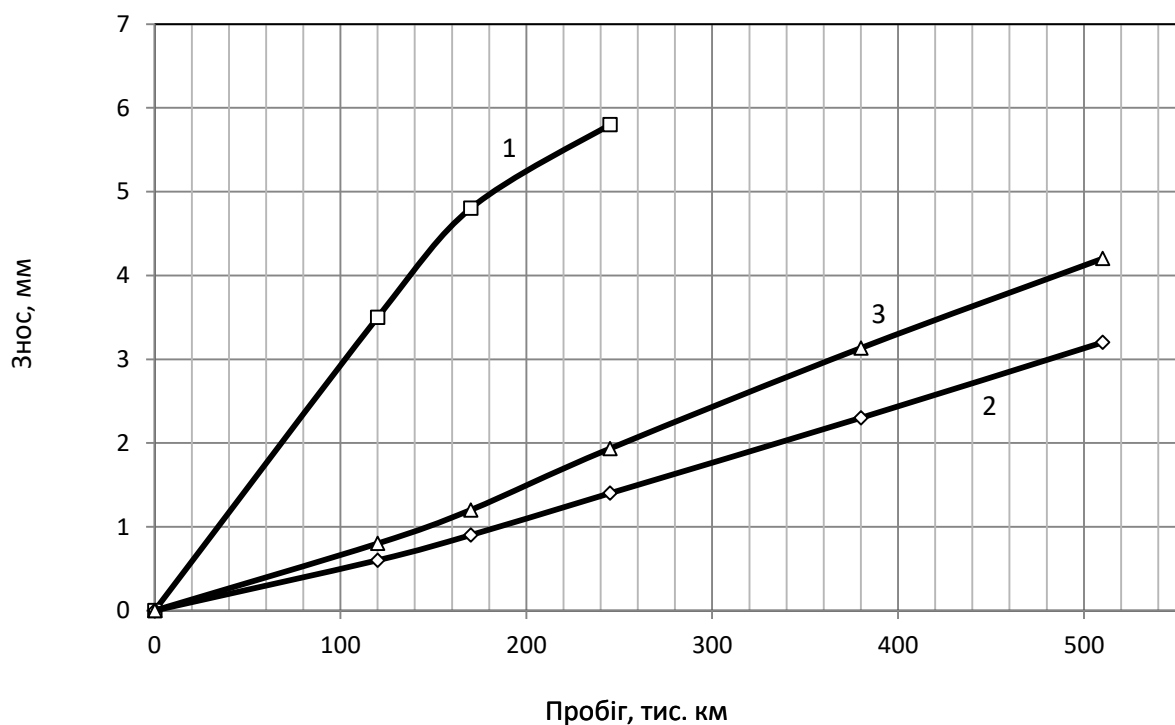


Рисунок 5.3 – Прогнозні лінії за допустимим зносом діаметрів підп'ятника, відновленого наварюванням композиційної стрічки складу: 1 – Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂; 2 – Fe-Cr-Ni-TiC

Величина зносу п'ятників піввагонів моделі 12-7023 під час взаємодії з підп'ятниками, відремонтованими наплавленням під шаром флюсу, вкладається в нормативно встановлений термін виконання деповського ремонту за пробігу 250 тис. км. Проте більший міжремонтний ресурс за такого виду відновлення підп'ятника не може бути забезпечений. Величина зносу п'ятників під час взаємодії з підп'ятниками, відремонтованими навареними композиційними стрічками, значно нижча, що забезпечує їхній міжремонтний ресурс. До того ж величина зносу є в 4,0...4,4 раза нижчою порівняно з базовим варіантом.



1 – ремонт наплавленням під шаром флюсу; 2 – ремонт наварюванням композиційної стрічки складу $\text{Fe-Cr-Ni-Cr}_3\text{C}_2$; 3 – ремонт наварюванням композиційної стрічки складу Fe-Cr-Ni-TiC

Рисунок 5.4 – Величина зносу п'ятників піввагонів моделі 12-7023, що взаємодіяли з відремонтованими підп'ятниками, залежно від пробігу з коефіцієнтом використання пробігу 0,5

Для прогнозування міжремонтного ресурсу за допустимим зносом діаметрів п'ятників піввагона побудуємо апроксимуючі лінії величини зносу, які наведемо на рис. 5.5.

Прогнозні лінії міжремонтного ресурсу п'ятника за допустимим зносом діаметрів при взаємодії з підп'ятником за станом зносу (див. рис. 5.5) указують на те, що міжремонтний пробіг для кривої 1 становить приблизно 1 млн. км, для кривої 2 – 740 тис. км. Наведені дані вказують на доцільність застосування запропонованих технологічних рішень у ремонтній практиці всіх вагоноремонтних депо українських залізниць.

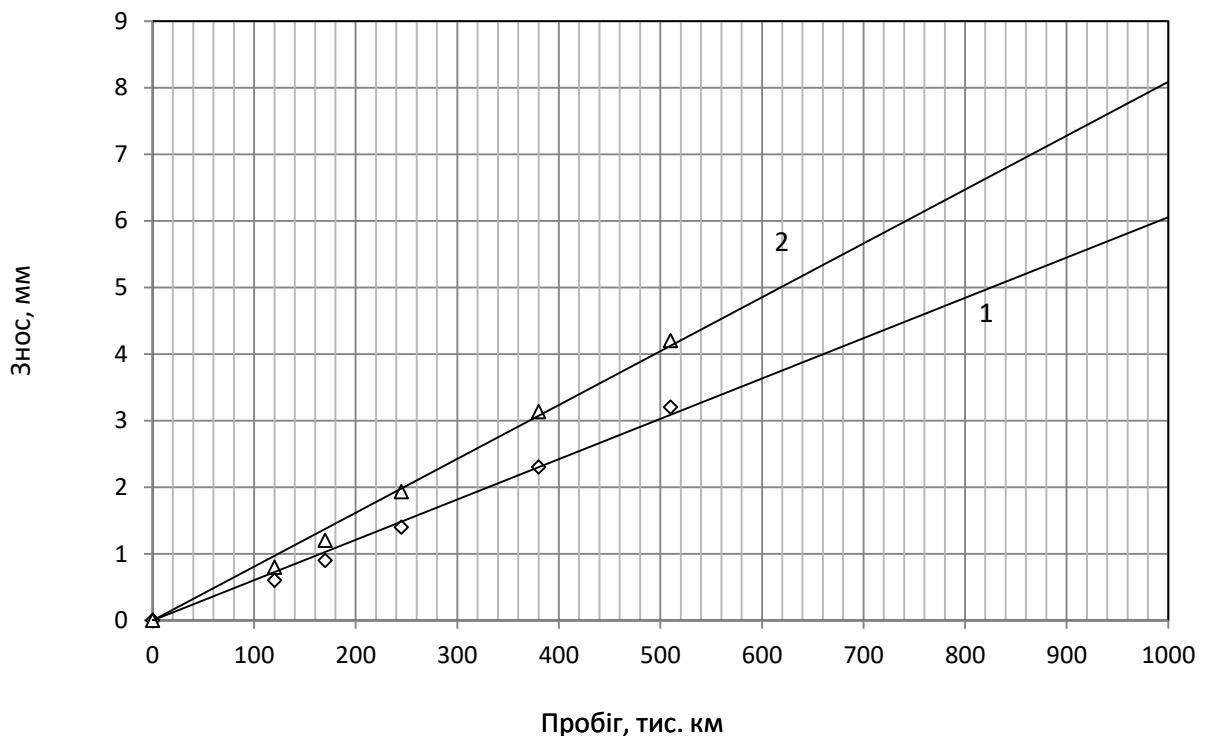


Рисунок 5.5 – Прогнозні лінії міжремонтного ресурсу п'ятника за допустимим зносом діаметрів під час взаємодії з підп'ятником, відновленим наварюванням композиційної стрічки складу: 1 – Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂; 2 – Fe-Cr-Ni-TiC

5.3 Міжремонтний ресурс п'ятникового вузла

Відповідно до наявної структури виконання ремонтів піввагонів моделі 12-7023, що наведена на рис. 5.6, міжремонтний пробіг цих піввагонів за станом зносу п'ятникового вузла не забезпечується.

Для підвищення міжремонтного ресурсу піввагона моделі 12-702 за станом зносу п'ятникового вузла пропонується технологічне рішення у вигляді застосування контактного наварювання композиційних стрічок на циліндричну поверхню підп'ятників, яке мало теоретичне обґрунтування, експериментальне та експлуатаційне підтвердження.

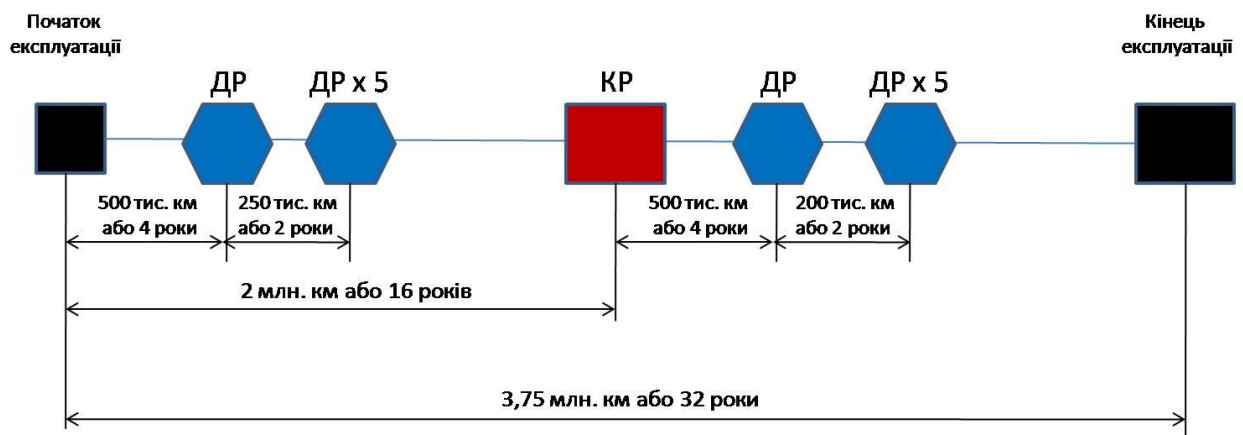


Рисунок 5.6 – Структура ремонту піввагона моделі 12-7023

Вищенаведені результати досліджень стану зносу п'ятникового вузла дають можливість говорити про зменшення величини та інтенсивності зносу і, відповідно, подовження терміну виконання деповського ремонту в 2 рази. Тоді можна забезпечити міжремонтний ресурс до 500 тис. км пробігу, значення якого кратно до міжремонтного ресурсу інших ресурсовизначальних вузлів та деталей цього піввагона. Структура ремонтів піввагона моделі 12-7023 буде мати такий вигляд (рис. 5.7) із забезпеченням гарантованого міжремонтного ресурсу.

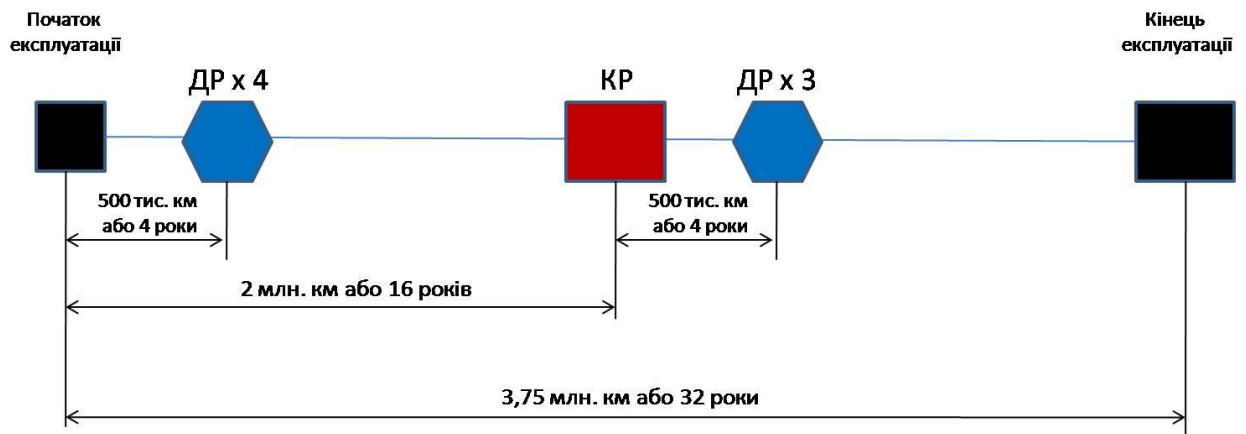


Рисунок 5.7 – Удосконалена структура ремонтів піввагона моделі 12-7023

Як бачимо з наведеної структури (рис. 5.7), кількість ремонтів піввагона моделі 12-7023 скорочується, а відповідно і час простою в ремонті також знижується, що вказує на доцільність застосування запропонованих технологічних рішень, виходячи з техніко-економічного критерію.

5.4 Техніко-економічна оцінка запропонованих технологічних рішень

Економічна ефективність застосування способу контактного наварювання композиційних стрічок до циліндричної поверхні під'ятника полягає в зниженні величини та інтенсивності зносу. Як наслідок, забезпечується підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів. Крім того, зменшується кількість технічних впливів на вантажний вагон під час проведення деповських ремонтів.

Рішення про доцільність відновлення зношених циліндричних поверхонь під'ятників зносостійкими композиційними стрічками приймається на підставі розрахунку річного економічного ефекту, який можна визначити за формулою

$$E_{p.n.} = (C_1 - C_2)N + E_n(K_1 - K_2), \quad (5.1)$$

де C_1, C_2 – собівартість відновлення 1 дм² поверхні підп'ятника контактним наварюванням композиційних стрічок і наплавленням під шаром флюсу відповідно, грн;

N – площа поверхні підп'ятника, що відновлюється за рік, дм²;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, $E_n = 0,15$.

K_1, K_2 – капітальні витрати за умов впровадження технології відновлення підп'ятників контактним наварюванням і наплавленням під шаром флюсу відповідно.

Розрахунок собівартості відновлення 1 дм² зношеної поверхні підп'ятника наплавленням під шаром флюсу (базовий варіант) і контактним наварюванням композиційної стрічки (запропонований варіант) наведено в табл. 5.1, а річний економічний ефект становить

$$E_{p.n.} = (11,081 - 10,831)4239 + 0,15(154000 - 128000) = 4959,75 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.1 – Розрахунок собівартості відновлення 1 дм² поверхні за базовою і запропонованою технологіями

Статті витрат собівартості відновлення 1 дм ² поверхні	Витрати, грн	
	Базовий варіант	Запропонований варіант
1	2	3
Матеріали	5	5,7
Основна заробітна плата	0,46	0,46
Додаткова заробітна плата	0,046	0,046
Відрахування (37%)	0,18	0,18
Витрати на утримання і експлуатацію обладнання, 250% від (Зо + Зд)	1,265	1,265

Продовження таблиці 5.1

1	2	3
Накладні витрати 500% від (Зо + Зд)	2,53	2,53
Витрати на енергію	1,35	0,9
Всього:	10,831	11,081

Застосування запропонованої технології відновлення підп'ятника контактним наварюванням композиційної стрічки дає змогу збільшити довговічність і міжремонтний ресурс п'ятникового вузла, що підтверджується експлуатаційними випробуваннями.

Економічний ефект за рахунок збільшення довговічності й міжремонтного ресурсу відновлених поверхонь підп'ятника визначається за формулою

$$E_{p.e.} = \left[(C_1 + E_n K_1^I) \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} - (C_2 + E_n K_2^I) \right] N, \quad (5.2)$$

де P_1 і P_2 – величини, зворотні міжремонтним ресурсам підп'ятника, відновленого за базовим і запропонованим варіантами;

K_1^I і K_2^I – питомі капіталовкладення п за базовим і запропонованим варіантами, грн.

Величина P визначається за формулою

$$P = \frac{1}{T_i}, \quad (5.3)$$

де T_i – міжремонтний ресурс підп'ятника, відновленого за i -м варіантом, у роках.

$$E_{p.e.} = \left[\left(11,081 + 0,15 \cdot \frac{154000}{4239} \right) \frac{0,5 + 0,15}{0,17 + 0,15} - \left(10,831 + 0,15 \cdot \frac{128000}{4239} \right) \right] 4239 =$$

$$= 75032,1 \text{ грн.}$$

Загальний економічний ефект за строк експлуатації вантажного вагона дорівнює сумі економії, що одержує вагоноремонтне підприємство $E_{p.n.}$, і економії від збільшення міжремонтного ресурсу підприємника $E_{p.e.}$:

$$E_p = E_{p.n.} + E_{p.e.} \quad (5.4)$$

$$E_p = 4959,75 + 75032,1 = 79991,85 \text{ грн.}$$

Показники техніко-економічної ефективності застосування запропонованої технології відновлення підприємника контактним наварюванням композиційної стрічки наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Показники техніко-економічної ефективності застосування технології відновлення підприємника контактним наварюванням композиційної стрічки

Найменування	Одиниці вимірювання	Значення показника	
		базовий варіант	запропонований
1	2	3	4
Площа поверхні, що відновлюється за рік	дм ²	4239	4239
Загальні капіталовкладення	грн	128000	154000
Питомі капіталовкладення	грн/дм ²	30,19	36,32

Продовження таблиці 5.2

1	2	3	4
Собівартість відновлення 1 дм ² поверхні	грн	10,831	11,081
Річна економія	грн	-	4959,75
Річний економічний ефект на 1 дм ² поверхні	грн	-	1,17
Строк окупності	років	-	1,9
Економічний ефект при експлуатації п'ятникових вузлів	грн	-	75032,1
Загальний економічний ефект	грн	-	79991,85

Висновки до розділу 5

У процесі виконаних експлуатаційних досліджень головним завданням було забезпечити рівномірний знос за діаметром підп'ятника, оскільки п'ятникові вузли потребують передчасного ремонту через підвищений знос саме в поздовжньому напрямку вантажного вагона. Результати експлуатаційних досліджень стану зносу відновлених підп'ятників надресорних балок піввагонів моделі 12-7023, які проводились упродовж 4 років, показали, що підп'ятники, відновлені наплавленням під шаром флюсу, за станом зносу потребують деповського ремонту на пробігу 160...180 тис. км. Поверхні підп'ятника, відновлені наварюванням композиційних стрічок складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ і Fe-Cr-Ni-TiC, за станом зносу не потребували передчасного ремонту. Крім того, величина зносу за пробігу 510 тис. км становить 5,8...6,1 мм. Прогнозні значення міжремонтного ресурсу підп'ятника за станом зносу становлять 660 тис. км і 680 тис. км пробігу відповідно для двох випадків.

Величина зносу п'ятників піввагонів моделі 12-7023 під час взаємодії з підп'ятниками, відремонтованими наплавленням під шаром флюсу, вкладається у нормативно встановлений термін виконання деповського ремонту за пробігу 250 тис. км. Проте більший міжремонтний ресурс за такого виду відновлення підп'ятника не може бути забезпечений. Величина зносу п'ятників під час взаємодії з підп'ятниками, відремонтованими навареними композиційними стрічками, значно нижча, що забезпечує їхній міжремонтний ресурс. При цьому величина зносу є в 4,0...4,4 раза нижчою порівняно з базовим варіантом.

Прогнозування міжремонтного ресурсу за допустимим зносом діаметрів п'ятників піввагона показало, що пробіг до ремонту для підп'ятників з навареними композиційними стрічками складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ становить приблизно 1 млн км, а для підп'ятників з навареними композиційними стрічками складу Fe-Cr-Ni-TiC – 740 тис. км.

Наведені дані вказують на доцільність застосування запропонованих технологічних рішень у ремонтній практиці всіх вагоноремонтних депо українських залізниць.

Відповідно до існуючої структури виконання ремонтів піввагонів моделі 12-7023, міжремонтний пробіг 250 тис. км за станом зносу п'ятникового вузла не забезпечується. Для підвищення міжремонтного ресурсу піввагона моделі 12-7023 за станом зносу п'ятникового вузла пропонується технологічне рішення у вигляді застосування контактного наварювання композиційних стрічок на циліндричну поверхню підп'ятників, яке мало теоретичне обґрунтування, експериментальне та експлуатаційне підтвердження. Результати досліджень дають можливість говорити про зменшення величини й інтенсивності зносу і, відповідно, подовження терміну виконання деповського ремонту в 2 рази. У роботі запропоновано нову структуру ремонтів піввагона моделі 12-7023 із забезпеченням гарантованого міжремонтного ресурсу. При цьому кількість ремонтів вагонів скорочується, а час простою в ремонті знижується, що вказує на доцільність застосування

запропонованих технологічних рішень, виходячи з техніко-економічного критерію.

Виконана техніко-економічна оцінка запропонованих технологічних рішень підтвердила їхню доцільність. Загальний економічний ефект застосування запропонованої технології відновлення підп'ятника контактним наварюванням композиційної стрічки становить 79991,85 грн, а строк окупності – 1,9 роки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконаних досліджень у дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-прикладне завдання з підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів. Зокрема, у теоретичному аспекті розроблено модель і запропоновано вирази для визначення стану зносу п'ятникового вузла з прогнозуванням міжремонтного ресурсу, що на практиці дає змогу зменшити витрати на ремонт завдяки підвищенню міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів. Загалом можна зробити такі висновки.

1. Аналіз несправностей вузлів вантажних вагонів на залізницях України показав, що понад 80 % візків вантажних вагонів є морально та фізично зношеними. Під час подальшої експлуатації це спричинятиме накопичення дефектів у металі з утворенням тріщин, що пов'язано зі зниженням втомної міцності, а також викликатиме раптові відмови вагонів. У результаті виконаного аналізу було визначено необхідність підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів. Розглянуті технологічні методи ремонту та підвищення зносостійкості п'ятникових вузлів із застосуванням техніко-економічного критерію дали змогу обґрунтувати доцільність використання контактного наварювання для їхнього ремонту.

2. Дослідження експлуатаційного зносу п'ятників і підп'ятників надресорних балок візків вантажних вагонів виявили проблему передчасного виходу їх у ремонт через нерівномірний знос. Щоб запобігти передчасному зношуванню запропоновано застосування методу контактного наварювання зносостійких композиційних стрічок, що, на відміну від існуючих, передбачає наварювання на поверхню зносу підп'ятника композиційної стрічки різної товщини з дискретною зносостійкістю. Крім того, запропоновано залежність для визначення концентрації наповнювача композиційної стрічки з урахуванням властивостей матеріалів, що взаємодіють у п'ятниковому вузлі вантажного вагона.

3. Виконано теоретичне обґрунтування підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів з використанням технологічних методів поліпшення фізико-механічних та триботехнічних властивостей сполучених поверхонь п'ятникового вузла. Водночас уперше отримано модель для оцінки величини зносу циліндричної поверхні підп'ятника, яка враховує фізико-механічні та триботехнічні властивості матеріалів, що взаємодіють у п'ятниковому вузлі, і сумарні сили, що діють у поперечному й поздовжньому напрямках. Також вперше запропоновано вирази для визначення зазору в з'єднанні «п'ятник – підп'ятник», які враховують геометричне положення поверхонь, що взаємодіють, а також зміну величини зносу п'ятникового вузла в процесі експлуатації вантажного вагона. Удосконалено математичну модель геометрії зносу підп'ятника надресорної балки візка вантажного вагона, що, на відміну від існуючої, дає змогу для відповідних початкових умов з урахуванням опорного стану підп'ятника визначати його знос і геометрію поверхні на визначеному етапі експлуатації вантажного вагона.

4. Виконані дослідження фізико-механічних та триботехнічних властивостей відновлених поверхонь п'ятникового вузла підтвердили теоретичні передумови щодо підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів. Стендові дослідження показали, що величина зносу відремонтованих підп'ятників з навареними композиційними стрічками є в 2,7...5,6 разів меншою порівняно з величиною зносу підп'ятників, відремонтованих за допомогою наплавлення, і в 1,6...4,3 разів нижчою порівняно з величиною зносу підп'ятників з установленими зносостійкими елементами. Сумарні величини зносу п'ятникового вузла в умовах повного завантаження вантажного вагона залежно від пробігу становлять: з підп'ятниками, відремонтованими автоматичним наплавленням під шаром флюсу, – 0,82 мм на 10 тис. км пробігу; з підп'ятниками, відремонтованими встановленням зносостійких елементів, – 0,5 мм на 10 тис. км пробігу. Сумарна величина зносу поверхонь п'ятникового вузла з підп'ятниками,

відремонтованими навареними композиційними стрічками, у 2,7...4,7 разів менша порівняно з величиною сумарного зносу вузлів з підп'ятниками, відремонтованими за допомогою наплавлення, і в 1,6...3,5 разів нижча порівняно з величиною сумарного зносу п'ятникових вузлів з підп'ятниками, у які встановлені зносостійкі елементи.

5. Експлуатаційні дослідження з визначення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів моделі 12-7023 також підтвердили доцільність застосування контактної наварювання зносостійких композиційних стрічок. Установлено, що поверхні підп'ятника, відновлені наварюванням композиційних стрічок на основі Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ і Fe-Cr-Ni-TiC, за станом зносу не потребували передчасного ремонту. До того ж величина зносу за пробігу 510 тис. км становила 5,8...6,1 мм. Прогнозні значення міжремонтного ресурсу підп'ятника піввагона моделі 12-7023 за станом зносу відповідають пробігу 660 тис. км і 680 тис. км для двох випадків складу композиційних стрічок. Прогнозування міжремонтного ресурсу за допустимим зносом діаметрів п'ятників піввагона моделі 12-7023 показало, що пробіг до ремонту для підп'ятників з навареними композиційними стрічками складу Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ становить близько 1 млн км, а для підп'ятників з навареними композиційними стрічками складу Fe-Cr-Ni-TiC – 740 тис. км.

6. Виконано техніко-економічну оцінку запропонованих технологічних рішень, яка підтвердила їхню доцільність. Загальний економічний ефект від застосування запропонованої технології відновлення підп'ятника контактним наварюванням зносостійкою композиційною стрічкою становить 79 991,85 грн, а строк окупності – 1,9 року.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Аналіз та класифікація пошкоджень універсальних напіввагонів, які виникають за час їх життєвого циклу / Фомін О. В., Бурлуцький О. В. Вісник ВПІ, вип. 4, Листоп. 2010. С. 163–167.
- 2 Аулін, В.В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / Хмельницький національний університет. Хмельницький, 2015. 36 с.
- 3 Блохин, Е.П. Испытания подвижного состава железных дорог необходимо проводить в полном объеме во всем диапазоне скоростей движения, предусмотренных техническим заданием / М.Л. Коротенко // Залізничний транспорт України. – 2009. - №6. – С. 26-28.
- 4 Блохин, Е.П. О роли натуральных испытаний при оценке качества подвижного состава железных дорог / М.Л. Коротенко, И.В. Клименко // Вісник СНУ ім. В. Даля – № 5 (147) – Частина 2 – 2010.
- 5 Бобрицький, В.М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтобробних машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / Київ, 2007. 20 с.
- 6 Большаков В.И. Структурная теория упрочнения конструкционных сталей и других материалов: монография / В.И. Большаков, Л.И. Тушинский. – Д.: Свидлер, 2010. – 482 с.
- 7 Борзилов І.Д. Технологія технічного обслуговування та ремонту вагонів: Підручник – Харків: УкрДАЗТ, 2003. – Т. 1. – 246 с.
- 8 Бруякин, В.К., Мурадян Л.А., Мищенко А.А. Исследование эксплуатационных свойств надежности опытных вагонов в замкнутых маршрутах УЗ // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Матеріали 73 Міжнародної науково-практичної конференції. – Дн-вськ, 2013. – С. 52.
- 9 Венцель Є.С., Лисіков Є.М., Євтушенко А.В. Основи трибології та хімотології: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – 241 с.
- 10 Волощенко С.М. Створення наукових засад структуроутворення в високоміцному чавуні для підвищення зносостійкості змінних деталей сільгосптехніки та транспорту: дис. д-ра техн. наук. / Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України. Київ, 2018. 291 с.
- 11 Воронин, Н.Н. Износы в пятниковых узлах цистерн / Н.Н. Воронин, Зин Эй Мин, Н.Н. Воронин (мл.) // Мир транспорта. - 2013. - № 1. - С. 30-35.
- 12 Воронин, Н.Н. Приработка цилиндрических поверхностей пятниковых узлов вагонов / Н.Н. Воронин, Зин Эй Мин, Н.Н. Воронин (мл.) // Мир транспорта. - 2014. - № 3. - С. 14-21.
- 13 Вплив амплітуди і частоти коливань електродного дроту при дуговому наплавленні на формування і структуру наплавленого металу і проплавлення основного металу / А.А. Бабінець та ін. Автоматичне зварювання. 2020. №10. С.26-33.

- 14 Грибов В. М., Козарук В. В. Основы теории надежности авиационной техники: конспект лекций. Киев: КМУГА, 1994. 268 с.
- 15 Денисенко М.І. Відновлення та зміцнення деталей і робочих органів сільськогосподарських машин, працюючих в абразивному середовищі / Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 2023, вип. 53. С. 271-284. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.271-284>
- 16 Денисенко М.І., Зазимко О.В., Лабунець В.Ф. Дослідження поверхонь тертя робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин. Проблеми тертя та зношування: наук-техн. журнал. 2016. №1 (70). С.150-153.
- 17 Денисенко М.І., Опальчук А.С. Зношування та підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарських машин. Вісник ТНТУ. 2011. Ч.2. С.201-210.
- 18 Денисенко М.І., Рубльов В.І. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин з використанням точкового зміцнення. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ. 2011. Вип. 24, ч.2. С.28-35.
- 19 Державна служба статистики України: офіційний веб-сайт URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> .(дата звернення 15.06.2016)
- 20 Довідник основних показників роботи залізниць України (2003-2013 роки) / Вид. офіц. Київ: Мін-во трансп. та зв'язку України, Укрзалізниця, 2014. – 42 с.
- 21 ДСТУ 2860—94 Надійність техніки. Терміни та визначення
- 22 ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1995. 92 с.
- 23 ДСТУ 2861-94 Надійність техніки Аналіз надійності. Основні положення
- 24 ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги.
- 25 ДСТУ 2864-94 Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення
- 26 ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними
- 27 ДСТУ 3004-95. Надежность техники. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. – Київ: Держстандарт України, 1995. – 123 с.
- 28 ДСТУ 3021-95 ВИПРОБУВАННЯ І КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ Терміни та визначення
- 29 ДСТУ 3433-96. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. [Чинний від 01.01.1999]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1998. 41 с.
- 30 ДСТУ 7598:2014 Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм

- (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мін-во трансп. та зв'язку України, 1995. 167 с.
- 31 ДСТУ EN IEC 61123:2022 Випробування на надійність. Плани випробувань на відповідність коефіцієнту успіху (EN IEC 61123:2020, IDT; IEC 61123:2019, IDT)
 - 32 ДСТУ ISO 14040:2013 Екологічне керування. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура (ISO 14040:2006, IDT). Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 22 с.
 - 33 ДСТУ ISO 6847:2004 (ISO 6847:2000, IDT) Матеріали зварювальні. Наплавлення валка металу шва для хімічного аналізу.
 - 34 Единая программа и методика организации и проведения подконтрольной эксплуатации новых моделей грузовых вагонов и их составных частей: протокол 65-го заседания Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества. Таллин, 2016. 58 с.
 - 35 Ефремов Л. В. Ускоренные испытания стальных образцов на износостойкость методом искусственных баз / Л. В. Ефремов, А. В. Тикалов, А. Д. Бреки // Изв. вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 8. – С. 671-676.
 - 36 Закалов О.В. Основи тертя і зношування в машинах: навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 234 с.
 - 37 Інтегровані технології обробки матеріалів: підручник / Е. С. Геворкян, Л. А. Тимофєєва, В. П. Нерубацький, Мельник О. М. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – 238 с.
 - 38 Капіца М. І. Розвиток наукових основ удосконалення систем утримування тягового рухомого складу: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07. Дніпропетровський нац. ун-т залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. 349 с.
 - 39 Ковалевський С. В. Дослідження методу фрикційного електроімпульсного модифікування / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов, С. Г. Онищук // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. – Чернігів: Чернігівський національний технологічний університет, 2017. – Т. 1. – С. 146-147.
 - 40 Койчубеков, Б.К. Определение размера выборки при планировании научного исследования / Б.К. Койчубеков, М.А. Сорокина, К.Э. Мхитарян // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 4. – С. 71-74.
 - 41 Корж В. М. Газотермічна обробка матеріалів: навч. посіб. Київ: Екотехнологія, 2005. 196 с.
 - 42 Костыря В. Ю. Структурноупрочняемые самотермообрабатываемые СВС материалы / В. Ю. Костыря // Строительство. Материаловедение.

- Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения. – 2011. – Вип. 58. – С. 333-350.
- 43 Лашенко Г. И. Современные технологии сварочного производства. Киев: Екотехнологія, 2012. – 720 с.
- 44 Мартинов І. Е. Розвиток методів розрахунку та випробувань буксових підшипникових вузлів вантажних вагонів з урахуванням особливостей їх експлуатації: автореф. дис ... д-ра техн. наук: 05.22.07. Харків, 2009. 40 с.
- 45 Мельничук В. О., Мямлін С. В., Ісопенко І. В., Мямлін В. В. Удосконалення системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів. Збірник наукових праць ДонІЗТ. Донецьк: 2010. № 22. С. 101-108.
- 46 Мороз В.І., Логвіненко О.А., Іщенко В.І., Фомін О.В. Основи розрахунків на міцність: Опорний конспект лекцій /. Харків: УкрДАЗТ, 2012. 124 с.
- 47 Мурадян Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності // Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 52(1161). – С.127–130.
- 48 Мурадян Л. А. Определение количества объектов для проведения эксплуатационных испытаний вагонной техники / Л. А. Мурадян // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2013. – Вип. 139. – С. 83–86.
- 49 Мурадян Л. А. Опытные маршруты ДИИТ-УЗ: «Опытная эксплуатация – научные обоснования – массовое внедрение» / Л. А. Мурадян, В.Ю. Шапошник, А.А. Мищенко // Вагонный парк. – 2016. – № 5–6. – С. 57–59.
- 50 Мурадян Л. А., Подосьонов Д.О. Аналіз пошкоджень вантажних вагонів на ПАТ «Українська залізниця» // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Матеріали 76 Міжнародної науково-практичної конференції - Дн-вськ, 2016. – С. 22-24.
- 51 Мурадян Л. А., Подосьонов Д.О. Збільшення міжремонтного ресурсу вантажних вагонів з використанням дискретного розподілення твердості матеріалу // Вагонный парк. 2017. № 3-4. С. 62-64.
- 52 Мурадян Л. А., Подосенов Д. О. Підвищення міжремонтного ресурсу візків вантажних вагонів. Модель геометрії зносу підп'ятника // Наука та прогрес транспорту. 2017. № 1 (65). С. 61-69.
- 53 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосенов Д. О. Залежність величини зносу пари тертя «п'ятник – підп'ятник» від пробігу вантажного вагона // Наука та прогрес транспорту. 2017. № 6. С. 61-69.
- 54 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосенов Д. О. Повышение надежности грузовых вагонов с применением новых технологий изготовления и восстановления рабочих поверхностей // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2016. № 11. С. 49-54.
- 55 Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Подосьонов Д. О., Піценко І.В. Дослідження несправностей пасажирських вагонів / Редакція Міжнародного електронного науково-практичного журналу «WayScience». 2-3 грудня 2019 р. – Дніпро, 2019. – Т.2. – С. 548-553,

- 56 Мурадян Л.А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності // Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 52(1161). – С.127–130.
- 57 Мурадян Л.А. Описання відмов вагона при технологічному процесі виготовлення структурних елементів / Л.А. Мурадян. – Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2016. – С.
- 58 Мурадян Л.А., Міщенко А.А., Шапошник В. Ю. Проблеми визначення надійності піввагонів моделі 12-7023-01 на візках 18-7020 3А результатами дослідної експлуатації в маршрутах ДПТ-УЗ // Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження. Матеріали XIV Міжнародної конф. Дніпропетровськ. 2016. С.86-87
- 59 Мурадян Л.А., Міщенко А.А., Бруякин В.К. Исследование эксплуатационных свойств надежности опытных вагонов в замкнутых маршрутах УЗ // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: матеріали 73-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2013 С. 52.
- 60 Мурадян Л.А., Міщенко А.А., Шапошник В.Ю., Бубнов В.М., Тусіков Є.К., Ревякін В.В. Дослідження показників надійності піввагонів моделі 12-1905 на візках 18-1711 в експлуатації // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: матеріали 77-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпро, 2017. С.41-43.
- 61 Мурадян Л.А., Подосьонов Д.О. Експериментальні дослідження взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла / Матеріали 79 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». 16-17.05.2019 Дніпро С. 59-61.
- 62 Мурадян Л.А., Подосьонов Д.О. Підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів / Матеріали 78 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» 17-18.05.2018. С. 40-41.
- 63 Мурадян Л.А., Решетник Д.Ю., Бабаєв А.М. Модернизация пятникового узла // Вагонный парк № 5. – 2011. – С. 7-10.
- 64 Мурадян Л.А., Решетняк Ю.В., Гордійчук О.В., Бабаєв А.М., Міщенко А.А. Совершенствования пятникового узла грузового вагона // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Матеріали 71 Міжнародної науково-практичної конференції. – Дн-вськ, 2011. – С. 82.
- 65 Мурадян Л.А., Шапошник В.Ю. До питання про плани випробувань надійності механічних систем / бірник наукових праць УкрДУЗТ, 2015, вип. 157. С. 119-127.
- 66 Мурадян Л.А., Шапошник В.Ю., Винокурова С.В. Пути развития, тенденции и перспективы дальнейшего совершенствования тормозной колодки рельсового подвижного состава // Вагонный парк № 5-6. – 2015. – С. 8-11.

- 67 Мурадян Л.А., Шапошник В.Ю., Подосенов Д.О. Повышение надежности грузовых вагонов с применением новых технологий изготовления и восстановления рабочих поверхностей // Збірник наукових праць ДНУЗТ. Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – С. 24-31.
- 68 Мурадян Л.А. Індивідуальна модель прогнозу показників надійності вантажних вагонів. Тези доповідей 78 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпро, 2018. С.37-38.
- 69 Мурадян, Л.А. Определение количества объектов для проведения эксплуатационных испытаний вагонной техники / Л.А. Мурадян // 36. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 139. – С. 83-87.
- 70 Мямлин С.В. Мурадян Л.А., Дузик В.Н. Анализ показателей надежности полувагонов модели 12-7023-01 на тележках 18-7020 в эксплуатации // Проблемы та перспективи розвитку залізничного транспорту: матеріали 75-ї Міжнародної науково-практ. конф. Дніпропетровськ, 2015. С. 25-26.
- 71 Мямлін С. В., Скалозуб В. В., Мурадян Л. А. Адаптивні Байєсівські моделі оцінювання показників надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу // Збірник наукових праць УкрДУЗТ, 2018, вип. 182, С.80-91.
- 72 Мямлін С.В., Мурадян Л. А., Бабаєв А.М., Пуларія А.Л., Шапошник В. Ю. Проблеми існуючої системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів в Україні // Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу, енергозбереження. Матеріали XIV Міжнародної конф. Дніпропетровськ. 2016. С.89-91.
- 73 Мямлін С.В., Мурадян Л.А., Подосьонов Д.О. Підвищення надійності п'ятикутового вузла вантажного вагону // Залізничний транспорт України. 2018. № 1. С. 34-41.
- 74 Мямлін, С. В. Розробка конструкцій та машинобудівних технологій створення вантажних вагонів нового покоління / С. В. Мямлин // Вагонний парк. – 2014. – №10. – С. 4-9.
- 75 Мямлін, С. В., Проблема визначення терміну «надійність». Методологія побудови та вивчення надійності вантажних вагонів / С. В. Мямлин, Л. А. Мурадян, Д. М. Барановський // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2015. – №6(60). – С. 126-133.
- 76 Повышение износостойкости деталей судовых машин и механизмов покрытиями дискретной структуры. Технологическое обеспечение покрытий дискретной структуры электроконтактным припеканием / Б. А. Ляшенко, Ю. В. Волков, Е. К. Соловых, Л. А. Лопата // Проблеми тертя та зношування. – 2015. – № 2(67). – С. 110-126.
- 77 Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. - 89 с.

- 78 Порівняльний аналіз причин утворення дефектів на поверхні кочення вуглецевих та підвищеної твердості мікролегованих суцільнокатаних коліс / Узлов І.Г., Узлов К.І., Книш А.В., Хулін А.М., Дементьєва Ж.А., Мямлін С.В., Бруякін В.К. Мурадян Л.А.,] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ: ІЧМ НАН України. – 2011. – С. 3-12.
- 79 Прудников М. И. Антифрикционные твердосмазочные покрытия – современная альтернатива резбовым пастам для сборки обсадных труб / М. И. Прудников // Сфера. Нефть и газ. – 2016. – № 5 (55). – С. 30-32.
- 80 Решетняк Ю. В., Гордійчук О. В., Мурадян Л. А., Бабаєв А. М., Міщенко А. А. Совершенствования пятникового узла грузового вагона. Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Матеріали 71-ї Міжнародної науково-практ.конф. Дніпропетровськ, 2011. С. 82.
- 81 Розробка технологій і матеріалів для електроіскрового нанесення покриттів з метою підвищення терміну експлуатації і надійності деталей технологічного і енергетичного обладнання та інструментів / М.С. Стороженко та ін. Автоматичне зварювання. 2020. №10. С.21-24.
- 82 Савчук О. М. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения / О. М. Савчук, В. К. Бруякин, Л. А. Мурадян, А. А. Мищенко, Е. Р. Можейко // Вагонный парк. – 2009. – № 5/6. – С. 30–32.
- 83 Савчук О. М. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения / О. М. Савчук, В. К. Бруякин, Л. А. Мурадян, А. А. Мищенко, Е. Р. Можейко // Вагонный парк. – 2009. – № 7/8. – С. 8–11.
- 84 Савчук О.М., Мурадян Л.А., Бруякин, В.К., Мищенко А.А. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Матеріали 69 Міжнародної науково-практичної конференції. – Дн-вськ, 2009. – С. 56-57.
- 85 Савчук О.М., Мурадян Л.А., Бруякін, В.К., Міщенко А.А. Дослідження зразків нової техніки // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Матеріали 68 Міжнародної науково-практичної конференції. – Дн-вськ, 2008. – С. 75-76.
- 86 Сафронов О.М., Хозя П.О., Водянніков Ю.Я., Речкалов, В.С., Орлов О.В. Методи схематизації експлуатаційної навантаженості вантажного вагона / Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад. Вид: ДП «УкрНДІВ», Кременчук. Вип. 22. С.53-69.
- 87 Словарь-справочник по порошковой металлургии / Шведков Е. Л. и др. Киев: Наук. думка, 1982. 269 с.
- 88 Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / Зозуля В. Д. и др. Киев: Наук. думка, 1979. 257 с.
- 89 СТП 04-019:2018. Вагони вантажні. Ремонт візків. Правила виконання.
- 90 Сулим А.О, Сафронов О.М., Стринжа А.М., Хозя П.О. Шляхи удосконалення конструкції вантажних вагонів / Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології». Випуск 43/2024, С.47-60

- 91 Сулим А.О., Хозя П.А., Водяніков Ю.Я. Столетов С.О. Влияние конструктивных особенностей тележек моделей 18-4129 и 18-9817 с осевой нагрузкой 25 тс на динамические показатели грузовых вагонов / Транспортні системи і технології. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій- К: ДУІТ, 2019. – Вип.33. – С.171-188.
- 92 Тулупов В. Дослідження методу поверхневого зміцнення деталей із використанням алю-мотермії / В. Тулупов, С. Онищук // Технічні науки та технології. – 2021. – № 2(24). – С. 17-22. DOI: 10.25140/2411-5363-2021-2(24)-17-22.
- 93 Тулупов В., Онищук С. Дослідження технологій поверхневого зміцнення деталей машин. Технічні науки та технології, (3(25), 2021. С. 55–60. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3\(25\)-55-60](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3(25)-55-60)
- 94 ЦВ-0015 - Інструкції з ремонту візків вантажних вагонів
- 95 ЦВ-0043. Інструкція з технічного обслуговування вагонів в експлуатації: затв. наказом Укрзалізниці від 25.09.2008 р. № 417-Ц. Київ : ДП ПКТБ ЦВ Укрзалізниця. 2008. 144с.
- 96 ЦВ-0083 Інструкція з деповського ремонту та експлуатації візків вантажних вагонів моделі 18-100, модернізованих з встановленням елементів компанії "А. STUCKI
- 97 ЦВ-0142. Вагони вантажні залізниць України колії 1520 (1524) мм. Настанова з деповського ремонту від 26.12.2013 р. № 468-Ц/од. Київ: Мін-во Інфраструктури України. 2013. 159с.
- 98 Эдигаров В. Р. Поверхностная фрикционно-электрическая обработка алюминиевых сплавов / В. Р. Эдигаров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – Вип. 10. – С. 47–53. DOI: 10.18698/0536-1044-2020-10-47-53.
- 99 Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения / Савчук О.М., Бруякин В.К., Мурадян Л.А., Мищенко А.А., Коробка Б.А., Можейко Е.Р. // Вагонный парк № 5-6. – 2009. – С. 3-6.
- 100 Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения / Савчук О.М., Бруякин В.К., Мурадян Л.А., Мищенко А.А., Коробка Б.А., Можейко Е.Р. // Вагонный парк № 7-8. – 2009. – С. 6-9.
- 101 Abrahamsi S. T., de Kok J. M., Terryn H., and Mol J. M., "Towards Cr(VI)-free anodization of aluminum alloys for aerospace adhesive bonding applications: A review", Frontiers of Chemical Science and Engineering, vol. 11, no. 3, pp. 465-482, 2017.
- 102 Alexander B. H., Checkoway H., Wechsler L., Heyer N. J., Muhm J. M., and O’Keeffe T. P., "Lung cancer in chromateexposed aerospace workers", Journal of Occupational and Environmental Medicine, vol. 38, no. 12, pp. 1253-1258, 1996.
- 103 Baranovskyi D., Myamlin S., Muradian, L., Bulakh M. Podosonov D. Determination of the Filler Concentration of the Composite Tape. Applied Sciences, Section: Mechanical Engineering, 2022/10/31. DOI: 10.3390/app122111044.

- 104 Baranovskyi, D., Myamlin, S., Podosonov, D., Muradian, L. Determination of the filler concentration of the composite material to reduce the wear of the central bowl of the rail truck bolster // *Ain Shams Engineering Journal* This link is disabled, 2023, 14(12), 102232.
- 105 Bazaluk O., Dubei O., Ropyak L., Shovkopliash M., Pryhorovska T., and Lozynskyi V., "Strategy of compatible use of jet and plunger pump with chrome parts in oil well", *Energies*, vol. 15, no. 15, art. no. 83, 2022.
- 106 Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie / Sergey Myamlin, Leonas Povilas Lingaitis, Stasys Dailydka, Gediminas Vaiciunas, Marijonas Bogdevicius, Gintautas Bureika // *Transport.* – 2015. – Vol. 30, Iss. 1. – P. 88–92.
- 107 Liang A., Ni L., Liu Q., and Zhang J., "Structure characterization and tribological properties of thick chromium coating electrodeposited from a Cr (III) electrolyte", *Surface and coatings technology*, vol. 218, pp. 23-29, 2013.
- 108 Мартинов І.Е., Труфанова А.В., Шовкун В. О., Балашов О. О. Аналіз чинників, впливаючих на аеродинамічний опір універсальних напіввагонів / Збір. наук. праць "Рейковий рухомий склад" Державного підприємства "Український науково-дослідний інститут вагонобудування". Вип. 29. 2024. С. 94-103. DOI: <https://doi.org/10.47675/2304-6309-2024-29-94-103>
- 109 Мартинов І.Е., Труфанова А.В., Шовкун В. О., Литовченко А. М., Дмитренко М.В., Балашов О.О. Дослідження технічного стану універсальних напіввагонів / Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту № 209 (2024). С. 43-55. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314256>
- 110 Мартинов І.Е., Труфанова А.В., Шовкун В. О., Литовченко А. М., Дмитренко М.В., Балашов О.О. Аналіз розвитку конструкцій кузовів напіввагонів / *Комунальне господарство міст. Науково-технічний збірник.* Серія: технічні науки та архітектура. 2024, том 3, випуск 184. С. 259-266. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-3-184-259-266>
- 111 Myamlin, S. V. The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing / S. V. Myamlin, D. M. Baranovskiy // Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету ім. ак. В. Лазаряна «Проблеми економіки транспорту». – 2014. – № 7. – С. 61-66.
- 112 Nykyforchyn H. M., Klapkiv M. D., and Posuvailo V. M., "Properties of synthesised in electrolyte plasma oxide-ceramic coatings on aluminum alloys", *Surface and Coatings Technology*, vol. 100-101, pp. 219-221, 1998.
- 113 Protsenko V. S., Danilov F. I., "Chromium electroplating from trivalent chromium baths as an environmentally friendly alternative to hazardous hexavalent chromium baths: comparative study on advantages and disadvantages", *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 16, no. 6, pp. 1201-1206, 2014.

- 114 Ropyak L. Y., Makoviichuk M. V., Shatskyi I. P., Pritula I. M., Gryn L. O., and Belyakovskiy V. O., Stressed state of laminated interference-absorption filter under local loading / *Functional Materials*, vol. 27, no. 3, pp. 638-642, 2020.
- 115 Safonova O. V., Vykhodtseva L. N., Polyakov N. A., Swarbrick J. C., Sikora M., Glatzel P., and Safonov V. A., "Chemical composition and structural transformations of amorphous chromium coatings electrodeposited from Cr (III) electrolytes", *Electrochimica Acta*, vol. 56, no. 1, pp. 145-153, 2010.
- 116 Shatskyi I. P., Ropyak L. Y., and Makoviichuk M. V., Strength optimization of a twolayer coating for the particular local loading conditions / *Strength of Materials*, vol. 48, no. 5, pp. 726-730, 2016.
- 117 Shillor M., Sofonea M., Telega J. J. Models and Analysis of Quasistatic Contact. *Lect. Notes Phys.* 2001. № 655. 31 p.
- 118 Student M. M., Ivasenko I. B., Posuvailo V. M., Veselivs'ka H. H., Pokhmurs'kyi A. Yu, and Sirak Ya. Ya., Influence of the porosity of a plasma-electrolytic coating on the corrosion resistance of D16 alloy / *Materials Science*, vol. 54, no. 6, pp. 899-906, 2019.
- 119 Student M. M., Dovhunyuk V. M., Posuvailo V. M., Koval'chuk I. V., and Hvozdet's'kyi V. M., Friction behavior of iron-carbon alloys in couples with plasmaelectrolytic oxide-ceramic layers synthesized on D16T alloy / *Materials Science*, vol. 53, no. 3, pp. 359-367, 2017.
- 120 Tomashov N. D., *Theory of Corrosion and Protection of Metals: The Science of Corrosion*, Boris H. Tytell and Isidore Geld, Eds. Michigan, USA: Macmillan, 1966
- 121 Vinokurov E. G., Burukhina T. F., and Kuroshev I. S., "Ranking of metallic and non-metallic coatings in the electrochemical surface treatment sector", *Tsvetnye Metally*, no. 4, pp. 54-58, 2021.
- 122 Yavors'kyi V. T., Kuntty O. I., and Khoma M. S., Electrochemical application of metal, conversion and composite coatings. L'viv: L'vivs'ka politekhnika, 2000 [in Ukrainian].
- 123 Zeng Z., Zhang J. Electrodeposition and tribological behavior of amorphous chromium-alumina composite coatings", *Surface and coatings technology*, vol. 202, no. 12, pp. 2725-2730, 2008.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у фахових виданнях України:

1. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., **Подосьонов Д. О.** Підвищення надійності вантажних вагонів із застосуванням нових технологій виготовлення та відновлення робочих поверхонь. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. № 11. С. 49–54. (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (Особисто здобувачем: запропоновано метод контактного наварювання зносостійких композиційних стрічок для відновлення поверхонь п'ятникового вузла вантажного вагона)
2. Мурадян Л. А., **Подосьонов Д. О.** Підвищення міжремонтного ресурсу візків вантажних вагонів. Модель геометрії зносу підп'ятника. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 1 (65). С. 79–87. (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (Особисто здобувачем: виконано аналіз зносів підп'ятників та запропоновано модель геометрії зносу підп'ятника)
3. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., **Подосьонов Д. О.** Залежність величини зносу пари тертя «п'ятник – підп'ятник» від пробігу вантажного вагона. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 6. С. 61–69. (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (Особисто здобувачем: побудовано залежність середньої величини зносу підп'ятника для випадків із різними значеннями коефіцієнта використання пробігу)

Статті у міжнародних виданнях та у виданнях, які включено до науково-метричних баз:

4. Baranovskyi D., Myamlin S., Muradian, L., Bulakh M., **Podosonov D.** Determination of the Filler Concentration of the Composite Tape. *Appl. Sci.* 2022. 12(21), 11044. <https://doi.org/10.3390/app122111044>. (Scopus, Web of Science) (Особисто здобувачем: обґрунтовано застосування контактної зварювання)

при використанні композиційної стрічки із змінними трибомеханічними властивостями)

5. Baranovskyi D., Myamlin S., **Podosonov D.**, Muradian L. Determination of the filler concentration of the composite material to reduce the wear of the central bowl of the rail truck bolster. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023. Vol. 14, is. 12. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102232>. (Scopus) (Особисто здобувачем: отримано математичну модель розподілу концентрації наповнювача в проєктованій композитній стрічці)
6. Мурадян Л. А., **Подосьонов Д. О.** Збільшення міжремонтного ресурсу вантажних вагонів з використанням дискретного розподілення твердості матеріалу. *Вагонний парк*. 2017. № 3-4. С. 62–64. (Особисто здобувачем: запропоновано технічні рішення до удосконалення п'ятникового вузла вантажного вагона)
7. Мямлін С. В., Мурадян Л. А., **Подосьонов Д. О.** Підвищення надійності п'ятникового вузла вантажного вагону. *Залізничний трансп. України*. 2018. № 1. С. 34–41. (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.) (Особисто здобувачем: проведено аналіз технологічних методів підвищення зносостійкості вагонних деталей).

Статті у фахових виданнях України:

8. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., **Подосьонов Д. О.**, Піценко І. В. Дослідження несправностей пасажирських вагонів. Сучасний рух науки: тези доп. IX міжнарод. науково-практ. інтернет-конф., 2-3 грудня 2019 р. Дніпро : Редакція Міжнарод. Електрон. науково-практ. журн. «WayScience», 2019. Т.2. С. 548–553. (Особисто здобувачем: виконано аналіз пошкоджень вагонів в експлуатації)
9. Мурадян Л.А., **Подосьонов Д.О.** Аналіз пошкоджень вантажних вагонів на ПАТ «Українська залізниця» / Матеріали 76 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» 19-20.05.2016. С. 22-23. (Особисто здобувачем: отримано

результати експлуатаційних досліджень стану зносу п'ятникових вузлів вагонів)

10. Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів. *Матеріали 78-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*, 17-18.05.2018. Дніпро, 2018. С. 40–41. (Особисто здобувачем: отримано залежність зносу центральної колодки від пробігу, враховуючи силове навантаження, фізико-механічні та триботехнічні властивості взаємодіючих матеріалів)
11. Мурадян Л. А., Подосьонов Д. О. Експериментальні дослідження взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла. *Матеріали 79-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. 16-17.05.2019. Дніпро, 2019. С. 59–61. (Особисто здобувачем: проведено експериментальні дослідження взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла).
12. Мурадян Л.А., Шапошник В. Ю., Подосьонов Д.О. Експериментальні дослідження взаємодії сполучених поверхонь п'ятникового вузла вантажних вагонів / *Матеріали 81 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. 22-23.04.2021 Дніпро С. 38-39. (Особисто здобувачем: рапропоновано технологічний процес контактного наварювання п'ятникових вузлів вантажних вагонів).

АКТ

впровадження результатів досліджень

Вагонне депо Батуринська Придніпровської Залізниці прийняло до впровадження в практику використання результатів експериментальних досліджень та рекомендації щодо технології відновлення сполучених поверхонь п'ятникового вузла контактним наварюванням зносостійкими композиційними стрічками, запропоновані Подосьоновим Д.О.

Застосування запропонованої технології відновлення підп'ятника контактним наварюванням композиційної стрічки дозволяє збільшити довговічність і міжремонтний ресурс п'ятникового вузла, що підтверджується експлуатаційними випробуваннями.

Економічна ефективність застосування контактного наварювання композиційних стрічок до циліндричної поверхні підп'ятника полягає в зниженні величини та інтенсивності зносу і, як наслідок, забезпечується підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів.

Прогнозування міжремонтного ресурсу за допустимим зносом діаметрів п'ятників піввагона моделі 12-7023 показало, що пробіг до ремонту для підп'ятників з навареними композиційними стрічками Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ складає близько 1 млн. км, а для підп'ятників з навареними композиційними стрічками Fe-Cr-Ni-TiC – 740 тис. км.

Начальник вагонного депо Батуринська

14.10.2017



Золотарь Д.В.

Акт

впровадження результатів досліджень

Вагонне депо Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської Залізниці прийняло до впровадження в практику використання результатів експериментальних досліджень та рекомендації щодо технології відновлення сполучених поверхонь п'ятникового вузла контактним наварюванням зносостійкими композиційними стрічками, запропоновані Подосьоновим Д.О.

Застосування запропонованої технології відновлення підп'ятника контактним наварюванням композиційної стрічки дозволяє збільшити довговічність і міжремонтний ресурс п'ятникового вузла, що підтверджується експлуатаційними випробуваннями.

Економічна ефективність застосування контактного наварювання композиційних стрічок до циліндричної поверхні підп'ятника полягає в зниженні величини та інтенсивності зносу і, як наслідок, забезпечується підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникового вузла вантажних вагонів.

Прогнозування міжремонтного ресурсу за допустимим зносом діаметрів п'ятників піввагона моделі 12-7023 показало, що пробіг до ремонту для підп'ятників з навареними композиційними стрічками Fe-Cr-Ni-Cr₃C₂ складає близько 1 млн. км, а для підп'ятників з навареними композиційними стрічками Fe-Cr-Ni-TiC – 740 тис. км.

Начальник вагонного депо
Нижньодніпровськ Вузол



Чопоров Є.В.

14.04.2017



Акти впровадження



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з наукової роботи
Юрій ПРОЙДАК

« 08 » 02 2025

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів досліджень Подосьонова Дмитра Олександровича за темою дисертаційної роботи «Підвищення надійності п'ятникових вузлів вантажних вагонів шляхом удосконалення технології їх відновлення»

В основі дисертаційної роботи Подосьонова Дмитра Олександровича лежать результати, які були їм отримані при виконанні теоретичних та практичних досліджень. Основні результати полягають в розробці методів підвищення міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів. Зокрема, у теоретичному аспекті розроблено математичну модель і запропоновано вирази для визначення стану зносу п'ятникового вузла з прогнозуванням міжремонтного ресурсу, що на практиці дає змогу зменшити витрати на ремонт завдяки підвищенню міжремонтного ресурсу п'ятникових вузлів вантажних вагонів. Використання даної моделі дозволяє оцінити величину зносу циліндричної поверхні підп'ятника з урахуванням фізико-механічних та триботехнічних властивостей матеріалів, що взаємодіють у п'ятниковому вузлу, і сумарних сил, що діють у поперечному й поздовжньому напрямках. У практичному аспекті в роботі запропоновано при ремонті застосування контактної наварювання зносостійких композиційних стрічок циліндричних поверхонь підп'ятника вантажного вагона, що дозволяє зменшити інтенсивність зносу в місцях контакту п'ятникового вузла.

Основні результати дисертаційної роботи Подосьонова Д.О. використовуються в лекційному курсі і при проведенні практичних занять з дисциплін "Надійність вагонів" та технічна діагностика вагонів", "Технологія ремонту вагонів" на кафедрі "Вагони та вагонне господарство" Українського державного університету науки і технологій.

Акт обговорений і схвалений на засіданні кафедри "Вагони та вагонне господарство" (протокол № 8 від 06.02.2025 р.).

Зав. кафедри
«Вагони та вагонне господарство»

Олексій РЕЙДЕМЕЙСТЕР