

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПАРИ «КОЛЕСО-РЕЙКА» З РІЗНИМИ ПОЧАТКОВИМИ ПРОФІЛЯМИ І СТУПЕНЕМ ЇХНЬОГО ЗНОСУ

Інститут технічної механіки

*Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
ул. Лещенко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: itm14b44@gmail.com*

Актуальною задачею для залізничного транспорту України є інтегрування до загальносвітової транспортної системи. Як відомо, вітчизняні та європейські залізниці відрізняються параметрами рейкової колії, що ускладнює залізничне сполучення. Міжнародний досвід показав, що найбільш перспективним шляхом вирішення цієї проблеми є застосування розсувних колісних пар, здатних підлаштовуватися під різну ширину колії. Також на залізницях України та країн ЄС застосовуються різні профілі коліс та рейок, форма яких значно впливає на взаємодію колії та рухомого складу. Як відомо, в процесі експлуатації ці форми можуть значно змінювати свою геометрію за рахунок припрацювання контактуючих тіл, а це може призвести до низки негативних наслідків через неузгодженість форм профілів коліс та рейок. Метою даної роботи є дослідження впливу зміни початкової форми профілів коліс та рейок в процесі зносу на їхній пружно-деформований стан для колісних пар, що рухаються по коліях 1520 мм та 1435 мм без заміни візків рухомого складу. При дослідженні форм профілів зношених коліс та рейок застосовувалися методи математичного та комп'ютерного моделювання. В якості методу дослідження пружно-деформованого стану контактної пари "колесо-рейка" застосовувався метод скінченних елементів, який дозволяє аналізувати різні інженерні конструкції зі складною геометрією і дає можливість проводити моделювання фізичних процесів в тривимірному просторі. В роботі виконано дослідження взаємодії зношених коліс та рейок з початковими профілями, що застосовуються на просторі колій 1520 мм та 1435 мм. Отримано розподіл контактних напружень по зонах профілю колеса та рейки для теоретично можливих в експлуатації варіантів контактних пар "колесо-рейка" при залізничному сполученні України та країн ЄС. Аналіз отриманих результатів дозволив провести оцінку умов взаємодії рухомого складу та рейкової колії при залізничному сполученні України з країнами ЄС без зміни колісних пар. За результатами досліджень впливу зміни форми профілів коліс на пружно-деформований стан було запропоновано рекомендації щодо доцільності застосування існуючих профілів та намічено шляхи вдосконалення геометрії ободів колісних пар, що рухаються по коліях 1520 мм та 1435 мм без заміни візків рухомого складу.

Ключові слова: залізничне сполучення України та країн ЄС, зношені профілі коліс та рейок, пружно-деформований стан контактної пари "колесо-рейка".

A topical problem for the Ukrainian railway transport is its integration into the world's transport system. The Ukrainian and the European railways differ in rail track parameters, which complicates railway communication. As shown by international experience, the most promising way to resolve this problem is to use gage-changeable wheelsets, which may be adjusted to different track gages. Besides, the Ukrainian and the EU railways use different wheel and rail profiles, whose shape greatly affects the rail-vehicle interaction. In service, the profile geometry may change significantly due to contacting pair wearing-in, which may result in a number of negative consequences caused by rail and wheel profile mismatch. The aim of this work is to study the effect of the wear-caused change of the initial rail and wheel profiles on the elastically deformed state of wheel-rail pairs for wheelsets operating on 1,520 mm and 1,435 mm gage railways without truck change. Worn wheel and rail profiles were studied by mathematical and computer simulation. The elastically deformed state of a wheel-rail pair was studied by the finite-element method, which allows one to analyze various complex-geometry engineering structures and perform a 3D simulation of physical processes. The interaction of worn wheels and rails with initial profiles used on 1,520 mm and 1,435 mm gage railways was analyzed to give the contact stress distribution over the wheel and rail profile zones for wheel-rail contact pairs theoretically possible in Ukraine-EU railway communication. This made it possible to assess rail-vehicle interaction conditions in Ukraine-EU railway communication without wheelset change. The results of the study of the effect of wheel profile change on the elastically deformed state made it possible to formulate recommendations on the practicability of existing profiles and direct ways to improving the profile geometry of wheelsets operating on 1,520 mm and 1,435 mm gage railways without truck change.

Keywords: Ukraine-EU railway communication, worn wheel and rail profiles, elastically deformed state of a wheel-rail contact pair.

Актуальною задачею для залізничного транспорту України є інтегрування до загальносвітової транспортної системи [1]. Як відомо, вітчизняні та європейські залізниці відрізняються параметрами рейкової колії, що ускладнює залізничне сполучення [2]. Міжнародний досвід показав, що найбільш перспективним шляхом вирішення цієї проблеми є застосування розсувних коліс-

них пар, здатних підлаштовуватися під різну ширину колії [3, 4]. Ресурс коліс рухомого складу істотно залежить від процесів, що виникають в контакті "колесо–рейка", на які, в свою чергу, впливають профілі робочих поверхонь ободів коліс і головок рейок. Таким чином, ресурсні показники коліс багато в чому залежать від узгодженості профілів рейок і коліс в зоні контакту. Особливо гостро ця проблема стоїть для екіпажів, що виконують сполучення між різними мережами залізниць без зміни колісних пар. Оскільки на кожній залізниці використовуються власні профілі коліс, а в процесі зношення їхня форма може значно змінитися, то справедливо припустити, що це може призвести до низки негативних наслідків через неузгодженість форм профілів коліс та рейок.

Тому актуальною є задача оцінки впливу зміни профілю в процесі зношення на взаємодію пари "колесо–рейка". Найбільш повну оцінку процесу взаємодії колеса і рейки можна отримати з аналізу їхнього пружно-деформованого стану [5–8]. Таке дослідження дозволяє проводити якісну оцінку розподілу контактних напружень в парі "колесо–рейка" і прогнозувати зони утворення дефектів контактної взаємодії.

Метою даного дослідження була оцінка впливу зміни форми профілів коліс та рейок в процесі зношення на їхній пружно-деформований стан. Досліджувалась взаємодія зношених коліс та рейок з початковими профілями, що застосовуються на просторах колій 1520 мм та 1435 мм.

В якості методу дослідження пружно-деформованого стану контактної пари "колесо–рейка" доцільно застосовувати метод скінченних елементів, який дозволяє аналізувати різні інженерні конструкції зі складною геометрією і дає можливість проводити моделювання фізичних процесів в тривимірному просторі.

Для моделювання контактної взаємодії коліс та рейок було побудовано їхні тривимірні моделі з урахуванням реальної форми зношених профілів. Для цього було проведено аналіз відкритих джерел з метою пошуку геометричних параметрів нових та зношених профілів коліс та рейок, що застосовуються на просторі колій 1520 мм та 1435 мм. На рис. 1 наведено форми зношених профілів коліс з початковим профілем S1002 (а) та рейок з профілем UIC60 (б), зняті за допомогою лазерних профілометрів для мережі залізниць з шириною колії 1435 мм та з підхилом 1/20 [9, 10].

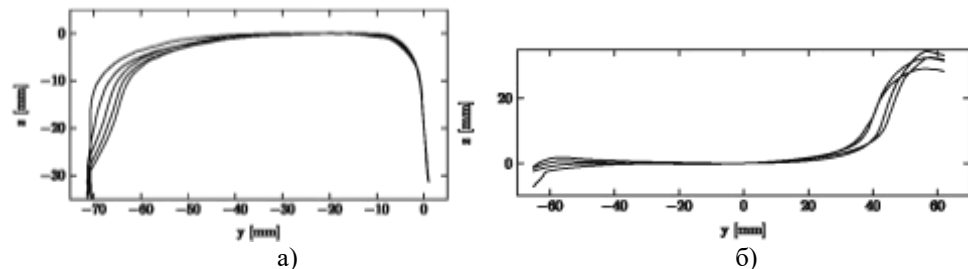


Рис. 1

Для моделювання вітчизняних коліс та рейок використовувалися типові форми профілів зношених коліс та рейок, отримані на основі численних вимірювань фахівцями Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ) [11].

Профілі зношених коліс з початковим профілем S1002 та за ГОСТ 9036-88 було поділено на три групи за ступенем їхнього зносу: незношені колеса (з товщиною гребеня 32 мм), середньозношені колеса (з товщиною гребеня 29 мм), сильнозношені колеса (з товщиною гребеня 26 мм). На основі цих геометричних параметрів було побудовано тривимірні моделі ободів залізничних коліс. На рис. 2, а) зображено моделі з початковим профілем за ГОСТ 9036-88, а на рис. 2, б) – з профілем S1002.

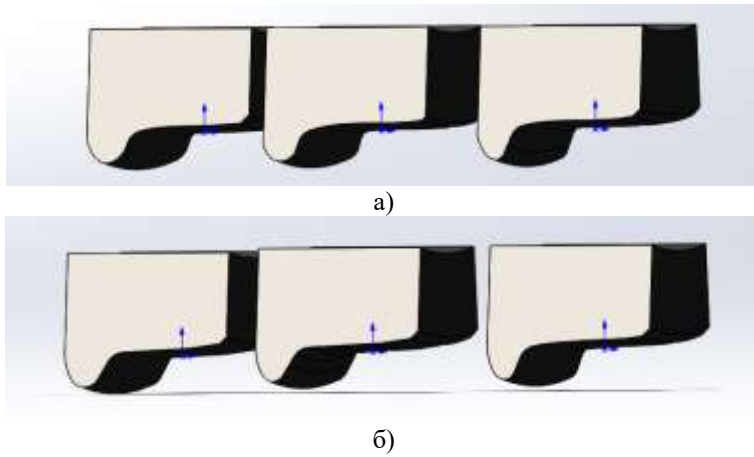


Рис. 2

Аналогічно було утворено три групи рейок: малозношені рейки (з бічним зносом 4 мм для рейок з початковим профілем Р65 та 2 мм для UIC60), середньозношені рейки (з бічним зносом 8 мм для рейок з початковим профілем Р65 та 5 мм для UIC60), сильнозношені рейки (з бічним зносом 14 мм для рейок з початковим профілем Р65 та 9 мм для UIC60). Величини бічного зносу для рейок з початковим профілем Р65 та UIC60 різні, оскільки для вітчизняних рейок характерні більші величини бічного зносу. Тривимірні моделі фрагментів головок рейок зображено на рис. 3, а) – з профілем UIC60, б) – з профілем Р65).

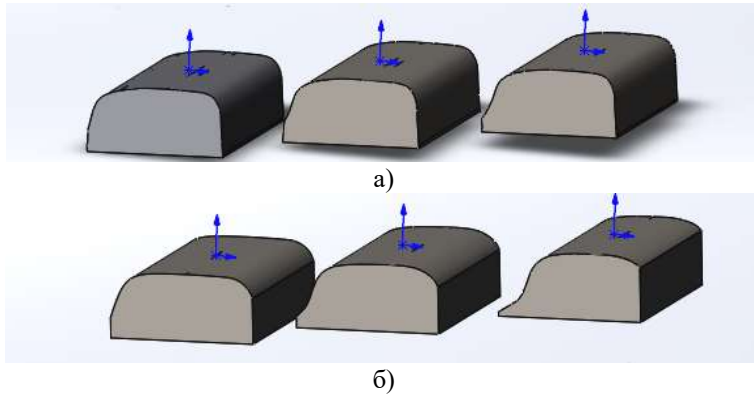


Рис. 3

Були побудовані моделі теоретично можливих варіантів контакту коліс та рейок з усіма зазначеними ступенями зносу. Приклад геометричної моделі "колесо-рейка" зі скінченноелементною сіткою представлено на рис. 4, а).

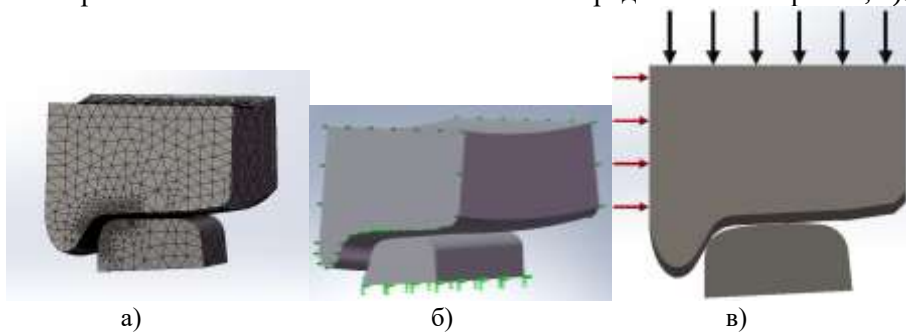


Рис. 4

Сітка містить близько 200 тисяч об'ємних скінченних елементів і 250 тисяч вузлів. З метою підвищення точності розрахунку контактних напружень, сітка має згущення в місцях можливого контакту обода колеса з головкою рейки.

Для моделі "колесо–рейка" використано такі граничні умови і прикладено такі навантаження:

- нульові переміщення для нижньої грані головки рейки у всіх напрямках і для грані поперечного перерізу сегмента колеса в поздовжньому напрямку (рис. 4, б));

- сили 30 кН і 100 кН відповідно до бічної і верхньої граней фрагмента колеса (рис. 4, в)).

Проведено ряд розрахунків контактних напружень в парі "колесо–рейка" для випадків взаємодії коліс та головок рейок з різним ступенем зносу та початковими профілями. Напруження обчислювалися за критерієм Мізеса, який визначає момент вичерпання несучої здатності порівнянням величини еквівалентних напружень з границею текучості матеріалу.

За результатами розрахунків отримано епюри напружень для різних варіантів контактних пар "колесо–рейка". На рис. 5 – рис. 10 зображено випадки контактів коліс з початковими профілями за ГОСТ 9036-88 та S1002 з рейками з різним ступенем зносу та початковим профілем Р65, що моделює гіпотетично можливу ситуацію руху рухомого складу по мережі вітчизняних залізниць.

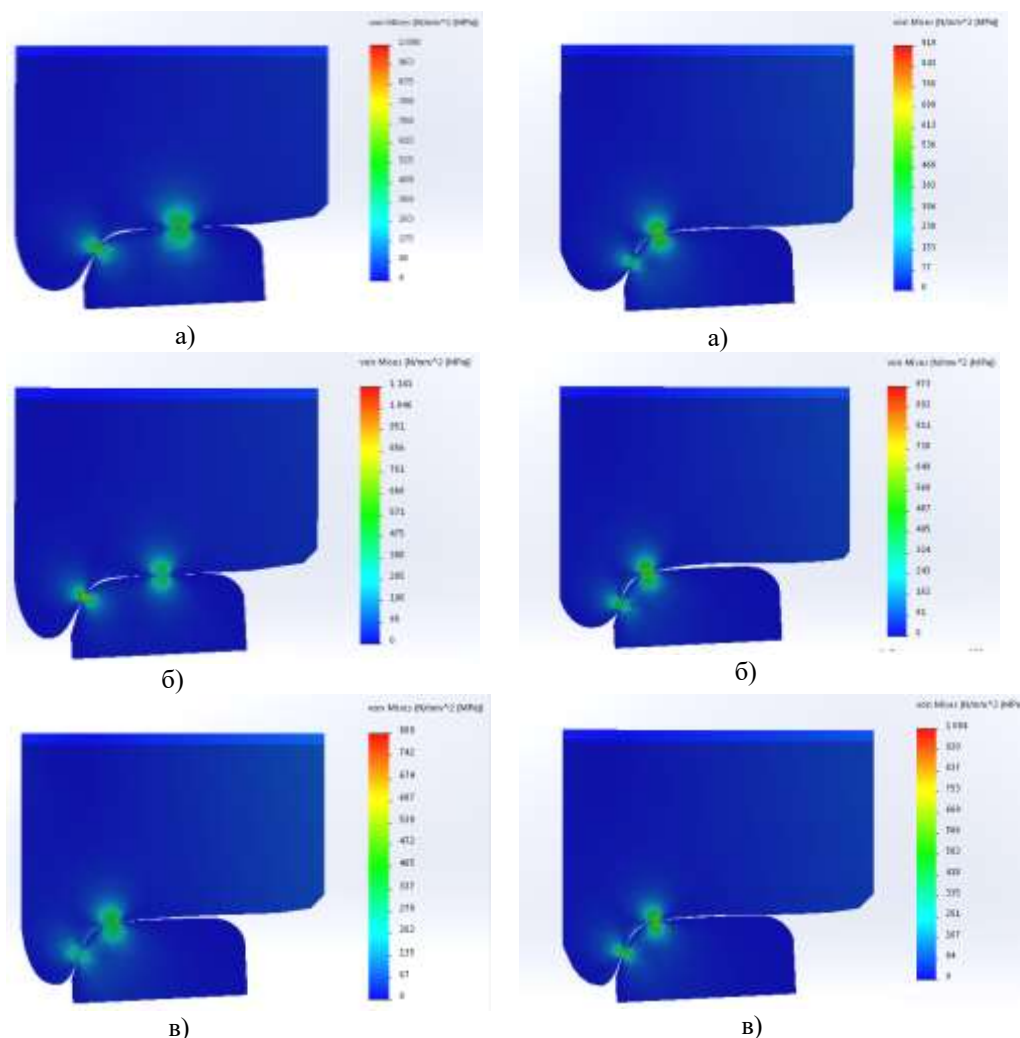
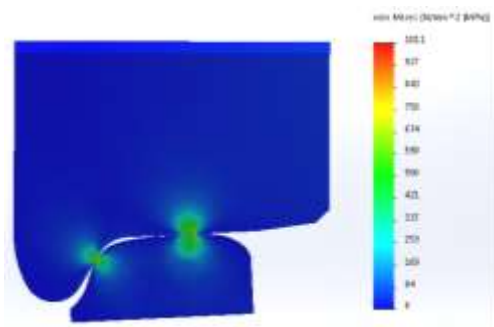


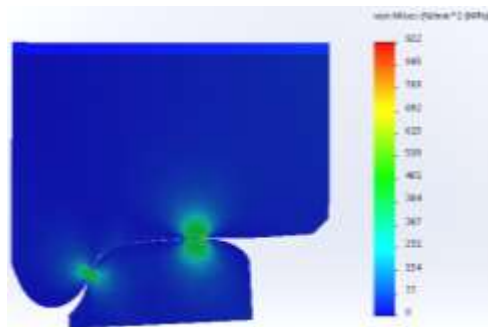
Рис. 5

Рис. 6

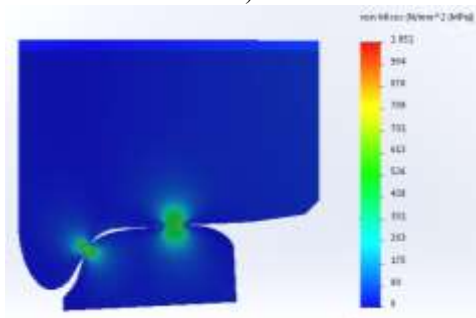
З аналізу контактної взаємодії коліс з початковими профілями за ГОСТ 9036-88 та рейок Р65 (рис. 5, 7 та 9) встановлено, що форма вітчизняного профілю коліс погано узгоджується з геометрією головок зношених рейок. При контакті нових та середньзношених коліс відбувається двоточковий контакт. Точка контакту на поверхні кочення знаходиться в центральній зоні профілю колеса, що не забезпечує оптимальних значень різниці радіусів катання коліс, необхідних для вписування в криві малого радіусу. Друга точка контакту знаходиться на гребені колеса, що в експлуатації призводить до інтенсивного зношення коліс. При контакті сильнозношених коліс по мірі їхнього припрацювання відбувається зміщення точки контакту ближче до викружки колеса, але контакт також двоточковий.



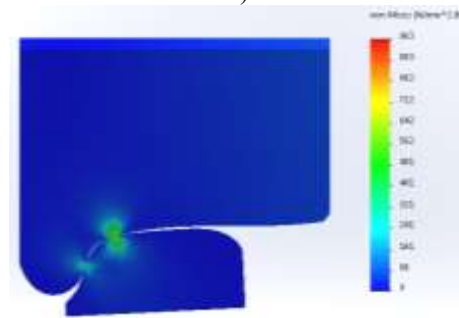
а)



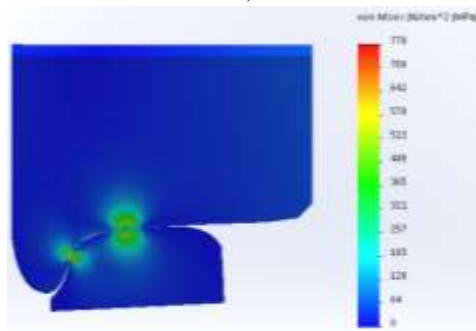
а)



б)

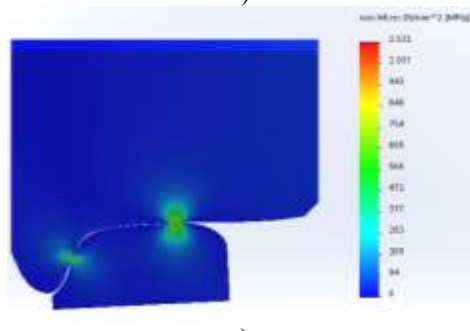


б)



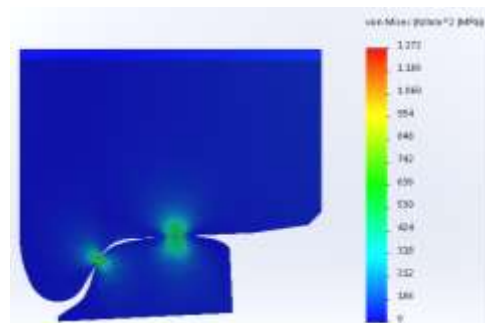
в)

Рис. 7

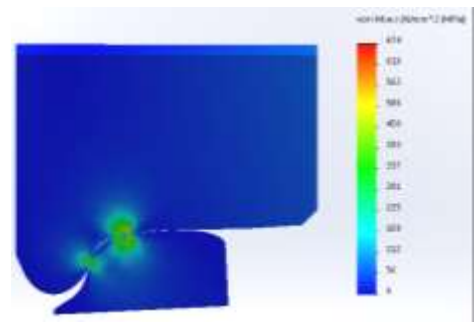


в)

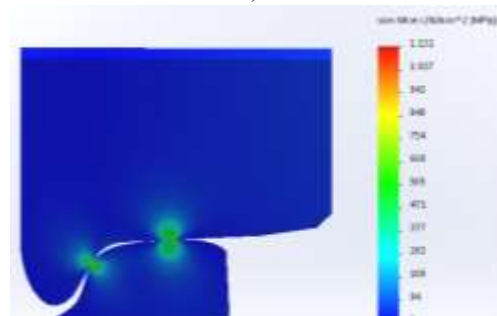
Рис. 8



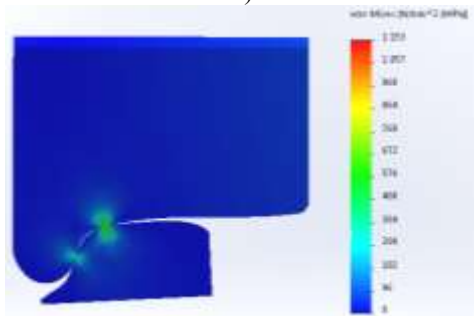
а)



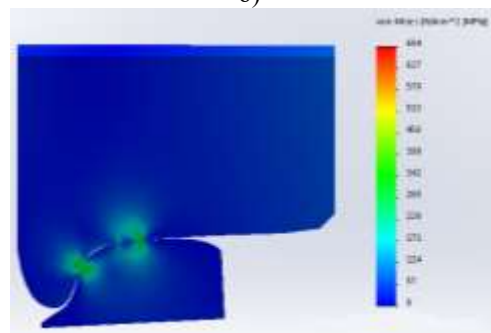
а)



б)

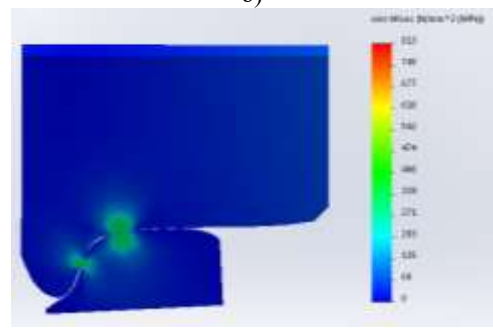


б)



в)

Рис. 9



в)

Рис. 10

При контакті коліс з початковими профілями S1002 та малозношених і сильнозношених рейок Р65 (рис. 6 та рис. 10) відбувається двоточковий контакт. При цьому перша точка знаходиться на викружці колеса, а друга – на його гребені. При русі по середньозношених рейках Р65 коліс з новим та сильнозношеним профілями S1002 перша точка контакту зміщається до центра профілю колеса, що, як зазначалось вище, є несприятливим фактором з точки зору зносу гребенів коліс.

Аналіз величин діючих напружень показав, що рух по рейках Р65 екіпажів, колеса яких мають початкові профілі S1002, не призводить до суттєвого збільшення контактних напружень на поверхні кочення коліс та головок рейок. Також слід відмітити, що по мірі припрацювання профілів відбувається

ся істотне зниження контактних напружень, що обумовлено збільшенням площі контактних плям.

На рис.11 – рис. 16 зображено випадки контактів коліс з початковими профілями за ГОСТ 9036-88 та S1002 з рейками з різним ступенем зносу та початковим профілем UIC60.

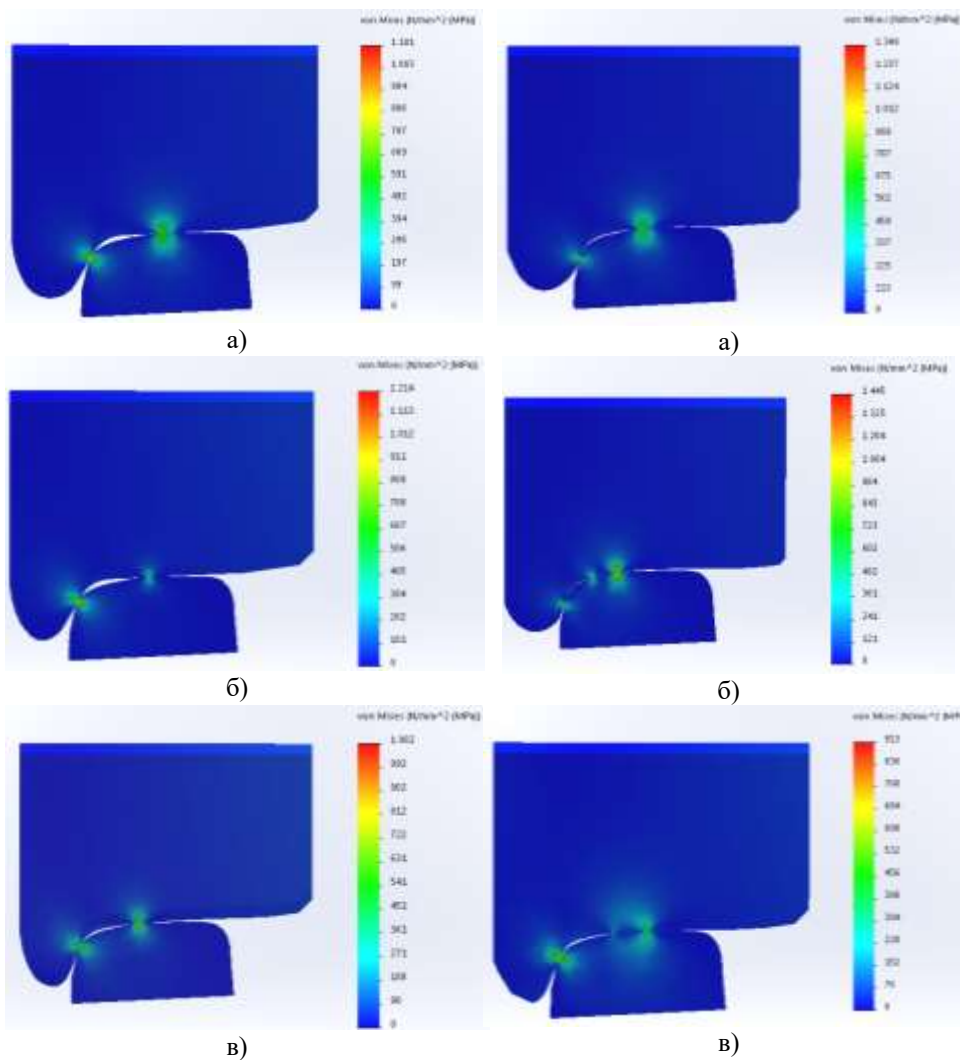
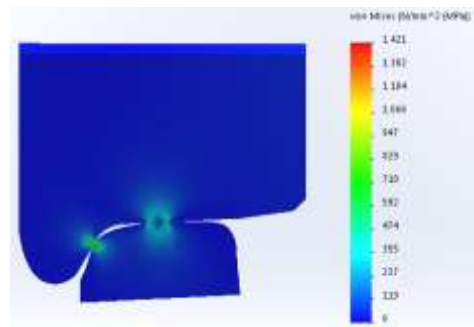


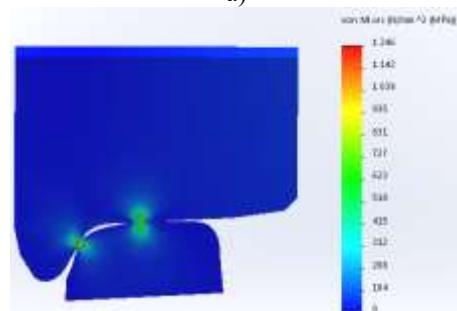
Рис. 11

Рис. 12

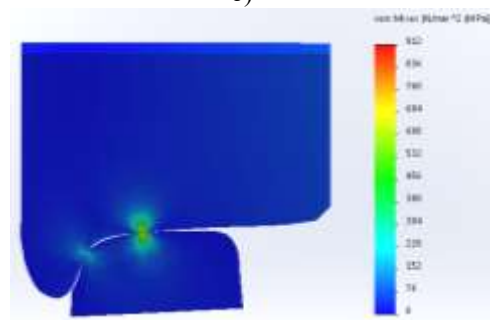
Для всіх варіантів контакту вітчизняних коліс з рейками UIC60 (рис. 11, рис. 13 та рис. 14) характерний двоточковий контакт, при якому перша точка контакту лежить ближче до центра профілю колеса. Такий же тип контакту характерний для сильнозношених коліс з профілем S1002 (рис. 12, в), рис. 14, в), рис. 16, в)).



а)

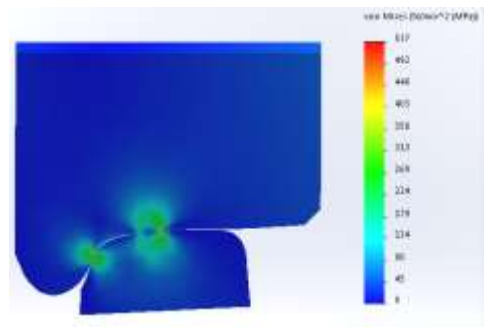


б)

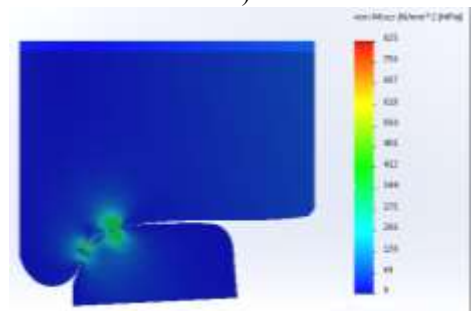


в)

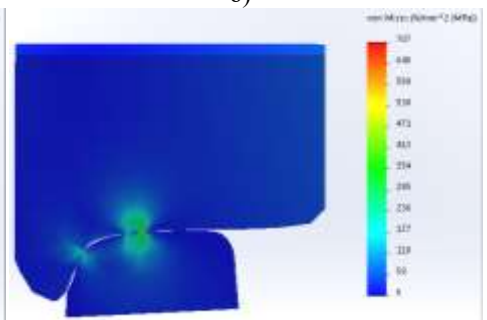
Рис. 13



а)



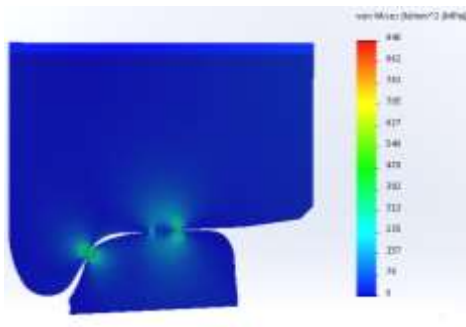
б)



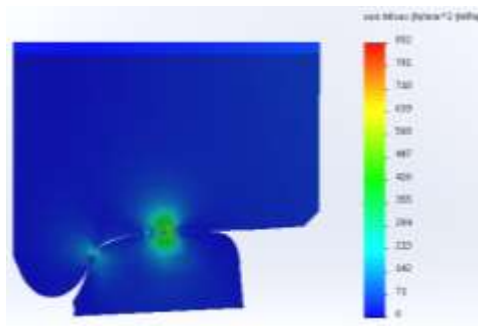
в)

Рис. 14

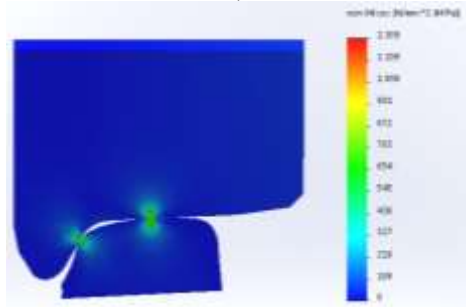
З аналізу величин діючих напружень можна зробити висновок, що при контакті коліс з початковими профілями за ГОСТ 9036-88 з рейками UIC60 в деяких випадках відбувається істотне збільшення контактних напружень на поверхні кочення коліс та головок рейок.



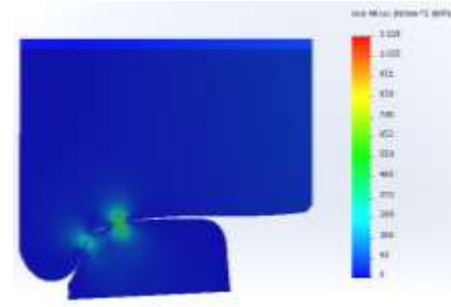
а)



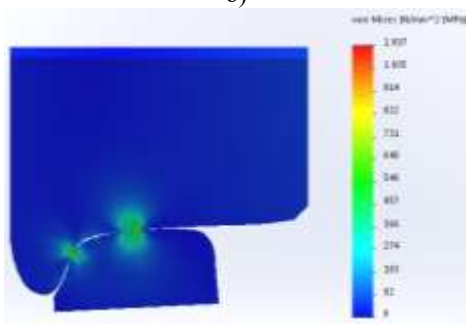
а)



б)

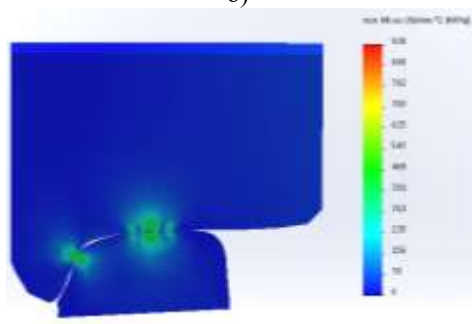


б)



в)

Рис. 15



в)

Рис. 16

Отримані результати свідчать про те, що контакт коліс з профілем S1002 з рейками Р65 є більш сприятливим, ніж коліс з профілем за ГОСТ 9036-88 з рейками UIC60. Але треба зазначити, що з усіх розглянутих варіантів контакту жоден не мав оптимальних параметрів для мінімізації контактних напружень та зменшення гребеневого зносу коліс.

Висновок. Виконано дослідження взаємодії зношених коліс та рейок з початковими профілями, що застосовуються на просторах колій 1520 мм та 1435 мм. Аналіз отриманих результатів показав, що з точки зору розподілу контактних напружень по зонах профілю колеса застосування існуючих профілів не є оптимальним. За результатами досліджень впливу зміни форми профілів коліс на пружно-деформований стан рекомендується виконати удосконалення форми профілю обода в зоні викружки з метою зниження діючих напружень та їхнього оптимального розподілу по поверхні кочення колеса.

Також слід відмітити, що варіант контакту зношених коліс з початковим профілем S1002 з рейками з профілем Р65 краще, ніж коліс з початковими профілями за ГОСТ 9036-88 з рейками UIC60, з точки зору мінімізації зносу гребенів коліс.

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. М-во інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/news/28581.html>
2. Чернецька-Білецька Н. Б., Нестеренко Г. І., Михайлов С. В. та інші. Інтєроперабельність українських залізниць і проблеми подолання системних стиків рейкової колії: Навчальний посібник. Сєвєродонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2020. 110 с.
3. Остапюк Б. Я., Пишійко О. М., Мямлін С. В., Савчук О. М. Удосконалення конструкції розсувних колісних пар. Залізничний транспорт України. 2014. №5. С. 31–35.
4. Shi H., Gan F., Li F., & Guo J. Numerical and experimental investigation of the wheel/rail interaction and dynamics for a high-speed gauge-changeable railway vehicle. *Vehicle System Dynamics*. 2021. P. 1–17. <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1942506>
5. Kosarchuk V. V., Danilenko É. I., & Agarkov A. V. Effect of railcar wheel tire profiles on the contact stress level in subway rails. *Strength of Materials*. 2020. №52(3). P. 398–406. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00190-x>
6. Magel E. Kalousek J. Designing and assessing wheel/rail profiles for improved rolling contact fatigue and wear performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017. № 231(7). P. 805–818. <https://doi.org/10.1177/0954409717708079>
7. Jian W., Ping W., Dao-lin M. Matching performance of CHN60N rail with various wheel profiles for Chinese high-speed railway. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2018. Vol. 383, No. 1. P. 012041. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/383/1/012041>
8. Xu K., Feng Z., Wu H., Xu D., Li F., Shao C. Optimal profile design for rail grinding based on wheel–rail contact, stability, and wear development in high-speed electric multiple units. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2020. № 234(6). P. 666–677. <https://doi.org/10.1177/0954409719854576>
9. Olofsson U., Telliskivi T. Wear, plastic deformation and friction of two rail steels – a full-scale test and a laboratory study. *Wear*. 2003. № 254 (1–2). P. 80–93. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00291-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00291-0)
10. Pålsson B., Nielsen J. Wheel-rail interaction and damage in switches and crossings. *Vehicle System Dynamics*. 2012. № 50 (1). P. 43–58. <https://doi.org/10.1080/00423114.2011.560673>
11. Подъяельников И. В. Определение типовых форм изношенных профилей головок рельсов на криволинейных участках пути. *Техническая механика*. 2009. № 3. С. 39–43.

Отримано 22.12.2021,
в остаточному варіанті 08.04.2022