

*С. В. БІРЮКОВ, С. О. ГУБСЬКИЙ*

## **ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ КРОНШТЕЙНУ РЕДУКТОРА В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ QFORM ТА FUSION**

В статті проводиться огляд кронштейну кріплення тягового редуктора, який є одним з елементів ходової частини вагону рухомого складу метрополітену. Вказано на особливості його конструкції та можливі несправності, які можуть виникати при експлуатації.

Також в статті наголошується на доцільності використання систем автоматизованого проектування та інженерного аналізу в машинобудуванні, розглянуто найбільш популярні програмні комплекси, які дозволяють вирішити широкий спектр задач в сучасній промисловості, тим самим забезпечуючи значні переваги на всіх етапах життєвого циклу виробу.

У статті проведено порівняльний аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану кронштейну кріплення редуктора, отриманих за допомогою двох програмних комплексів - QForm та Autodesk Fusion. В роботі розглянуто етапи підготовки моделі, застосування навантажень, закріплень, а також аналіз отриманих даних, таких як розподіл напружень.

Отримані результати порівнюються між собою та аналізуються на предмет їх відповідності та розбіжностей. За підсумками дослідження, зроблено висновки щодо доцільності використання кожного з програмних комплексів для конкретних типів інженерних завдань.

**Ключові слова:** метрополітен, вагон, кронштейн, кріплення редуктора, напружено-деформований стан, метод кінцевих елементів, розподіл напружень.

*S. BIRIUKOV, S. HUBSKYI*

## **COMPARISON OF THE RESULTS OF MODELING THE LOAD OF THE REDUCER BRACKET IN THE QFORM AND FUSION SOFTWARE COMPLEX**

The article reviews the traction reducer mounting bracket, which is one of the elements of the running gear of the subway rolling stock. The features of its design and possible malfunctions that may occur during operation are indicated.

The article also emphasizes the feasibility of using computer-aided design and engineering analysis systems in mechanical engineering, and considers the most popular software packages that allow solving a wide range of problems in modern industry, thereby providing significant advantages at all stages of the product life cycle.

The article provides a comparative analysis of the results of modeling the stress-strain state of the reducer mounting bracket, obtained using two software packages - QForm and Autodesk Fusion. The work considers the stages of model preparation, application of loads, fastenings, and analysis of the obtained data, such as stress distribution.

The results obtained are compared with each other and analyzed for their correspondence and discrepancies. Based on the results of the study, conclusions are drawn regarding the feasibility of using each of the software packages for specific types of engineering tasks.

**Key words:** subway, car, bracket, gearbox mounting, stress-strain state, finite element method, stress distribution.

### **Вступ.**

Рейковий рухомий склад метрополітену має досить складну конструкцію ходової частини [1], яка повинна відповідати суворим вимогам безпеки руху та правилам технічної експлуатації [2]. Кожен елемент цієї конструкції відповідно має свою технологію виготовлення, що суттєво впливає на подальшу надійну та довговічну експлуатацію. Багато деталей конструкції візка рухомого складу залізниць та метрополітенів виготовлено за допомогою технології обробки металів тиском, а саме штампуванням, що також впливає на міцність і довговічність як окремої деталі так і візка в цілому.

В даній статті виконано моделювання кронштейну підвішування редуктора вагону метрополітену, який виготовляється із штампованої заготовки. Кронштейн має циліндричну форму з проушиною на кінці, до якої прикріплюються деталі підвішування редуктора. Сам кронштейн вварюється в поперечну балку рами візка, що зображено на рисунку 1 [3].

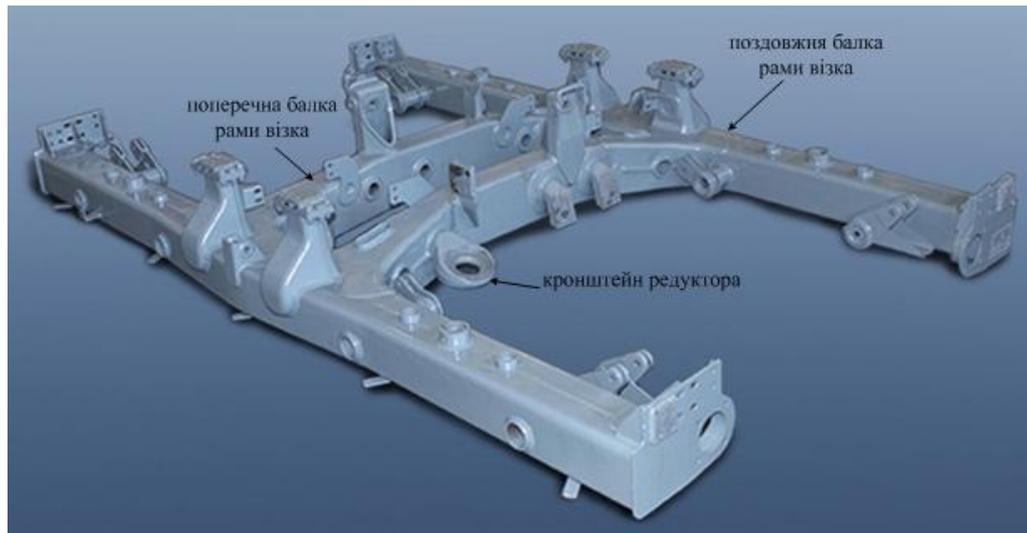


Рис. 1 – Рама повідцевого візка, вид знизу

Відповідно кронштейн сприймає навантаження від редуктора під час розгону та гальмування вагону, які з часом можуть призводити до виникнення тріщин у ньому або навіть до зламу (рисунок 2) [4], що неприпустимо, оскільки суттєво впливає на безпеку руху та зокрема на роботу тягового приводу. Тому кронштейн редуктора, як елемент ходової частини вагону, потребує постійного контролю під час технічного обслуговування або ремонту електропоїзда.



Рис. 2 – Злам кронштейну підвішування редуктора візка вагону типа Е

Для запобігання обертання корпусу редуктора вниз на рейковий шлях у випадку зламу деталей підвішування або кронштейну підвішування редуктора, який вварюється в поперечну балку рами, редуктор має комплексний запобіжний пристрій, як показано на рисунку 3. Комплексним пристрій зветься тому, що запобігає виходу редуктора за нижній габарит рухомого складу як у випадку зриву болта підвіски, так і у випадку зламу несучого кронштейну.

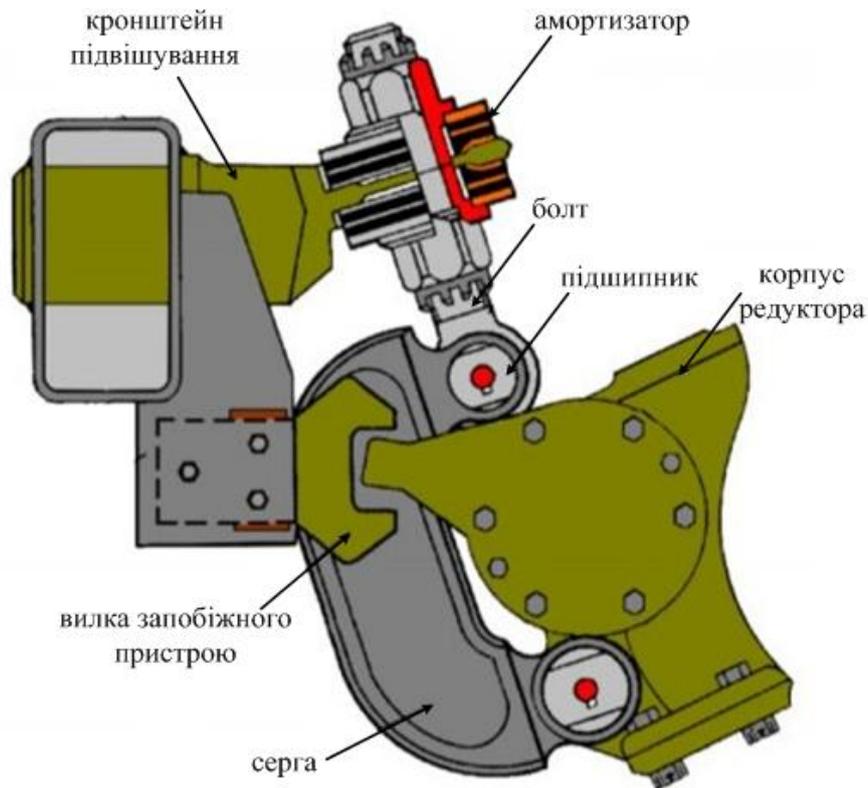


Рис. 3 – Підвіска редуктора

#### Аналіз останніх досягнень і публікацій.

В машинобудуванні широко застосовуються системи автоматизованого проектування та інженерного аналізу (CAD/CAE) [5, 6, 7, 8], які дозволяють не тільки змоделювати технологію виготовлення деталі, зробити її креслення, а й провести віртуальні випробування, аналіз та оптимізацію виробів на комп'ютерній моделі [9, 10]. Ці системи використовують різноманітні види моделювання, зокрема чисельний, до якого відноситься метод кінцевих елементів (FEM)[11, 12].

Найпоширенішим видом аналізу в CAE - системах є аналіз напружено-деформованого стану, який використовується для оцінки міцності, жорсткості та довговічності конструкцій і деталей. В різних галузях промисловості доцільно застосовувати CAE - системи в залежності від їх спеціалізації, наприклад аналіз параметрів твердого тіла або механізму, моделювання потоків рідин та газів, аналіз динамічних та нелінійних процесів, таких як краш-тести або вибухи. Одними з найбільш розповсюджених систем автоматизованого проектування та інженерного аналізу в машинобудуванні є:

- продукти компанії Autodesk, зокрема програми AutoCAD, Inventor, Fusion;
- продукти компанії Dassault Systèmes - програми Abaqus, Simpack, SolidWorks;
- програмне забезпечення компанії ANSYS - ANSYS Mechanical.

Існують також вузькоспеціалізовані програми[13, 14], зокрема QForm, яка використовує метод кінцевих елементів для моделювання деформації металу. QForm - це програмний комплекс, що відповідає самим сучасним вимогам у галузі моделювання процесів формозміни металу [15]. З її допомогою можуть бути ефективно досліджені практично всі відомі технологічні процеси обробки металів тиском, включаючи процеси штампування, вільного кування, прокатки, розкочування, екструзії профілів та багато інших спеціальних процесів формозміни металу.

#### Мета та постановка задачі.

Метою даної статті є аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану кронштейну підвішування редуктора за допомогою програмного комплексу QForm 11 та

порівняння його з результатами моделювання в програмі Fusion, модуль Simulation/Static Stress, що дозволяє проаналізувати деформацію та напруження в моделі під дією статичних структурних навантажень і обмежень. Проведене моделювання дозволить перевірити збіжність результатів, отриманих в різних програмах.

#### **Опис параметрів, що застосовувалися при моделюванні.**

Процес моделювання напружено-деформованого стану кронштейну редуктора в програмі QForm складається з наступних етапів. Задаємо тип операції – «деформація» та вказуємо в типі задачі «з урахуванням пружно-пластичних деформацій». Надалі завантажуюмо геометрію та додаємо вісь заготовки, що зображено на рисунку 4. Задаємо параметри заготовки: матеріал – carbon steel 20 cold (адже відбудуватиметься холодне деформування сталі), температура заготовки - 20°.

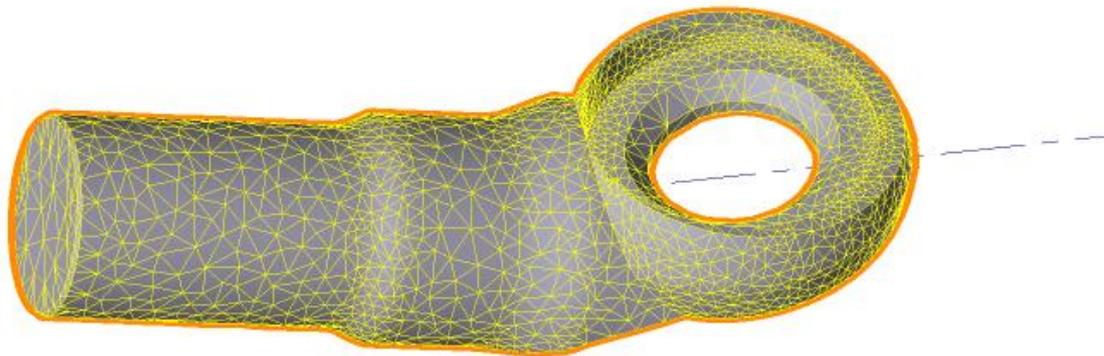


Рис. 4 – Модель кронштейна

В якості інструменту застосовуємо штучну циліндричну шайбу, яка апроксимовано змодельовано конструкцію підвіски редуктора, через яку буде відбуватися навантаження провусини кронштейну. Вставлена в провусину шайба зображена на рисунку 5.

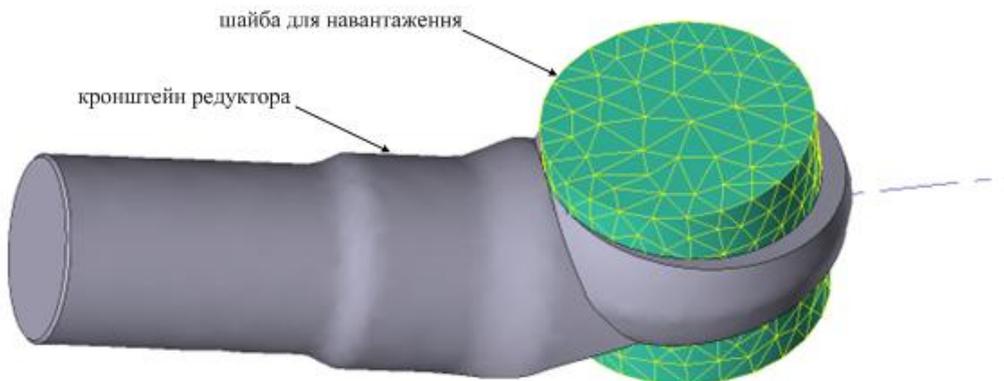


Рис. 5 – Модель кронштейна з встановленою шайбою

В якості привода інструменту оберемо гідравлічний прес із параметрами: номінальна швидкість – 5 мм/с, максимальна сила – 0,06 МН. Матеріал інструменту – сталь марки 5ХНМ, змащення не застосовуємо, температура інструменту - 20°. Додаємо граничну умову зупинки розрахунку за часом – 0,005 с, а також застосовуємо до заготовки ковочний маніпулятор на вкладці «граничні умови», що зображено на рисунку 6. Це необхідно для закріплення нерухомо циліндричної частини кронштейну, тим самим моделюючи його зварне кріплення в поперечній балці візка.

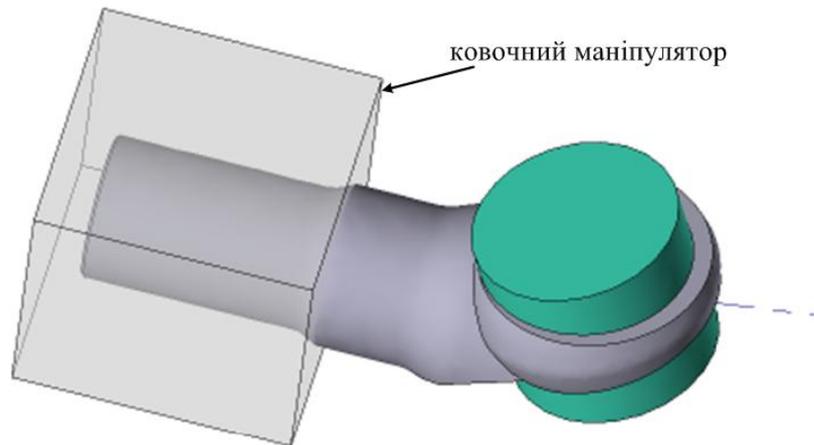


Рис. 6 – Розміщення ковочного маніпулятора на кронштейні

Для моделювання у програмі Fusion виконуємо наступні кроки. Завантажуємо модель кронштейна та в модулі Simulation обираємо Static Stress (статичне напруження).

Static Stress дозволяє зробити статичний аналіз напружень та досліджує, як деформується об'єкт і які напруження в ньому виникають під впливом постійних навантажень, таких як вага або тиск. Цей аналіз дозволяє оцінити міцність конструкцій, наприклад, балок або пластин, та визначити розподіл напружень і деформацій. Результати такого аналізу показують, де в моделі зосереджені найбільші напруження, деформації та який коефіцієнт запасу міцності.

Надалі задаємо матеріал кронштейна та циліндричної шайби – Steel AISI 1020 (як аналог сталі 20) та вказуємо поверхню кронштейна, яку необхідно закріпити – циліндрична частина. Вибравши шайбу, яка вставлена в проушину кронштейна задаємо величину навантаження та поверхню шайби, на яку воно буде діяти, що зображено на рисунку 7.

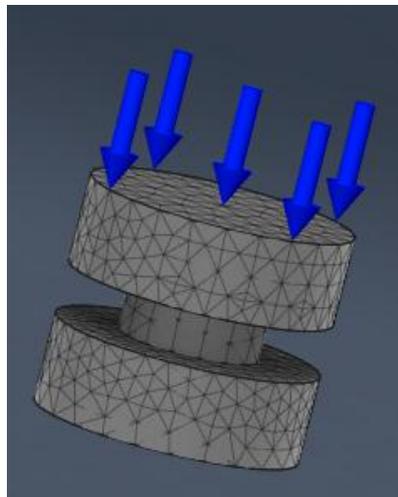


Рис. 7 – Циліндрична шайба, через яку передаватиметься навантаження

Також задаємо тип контакту між проушиною кронштейну та шайбою – bonded (пов'язаний) та вказуємо розмір сітки (розмір кінцевих елементів), на яку розбиватиметься модель, адже аналіз буде виконуватися за допомогою метода кінцевих елементів, як зображено на рисунку 8.

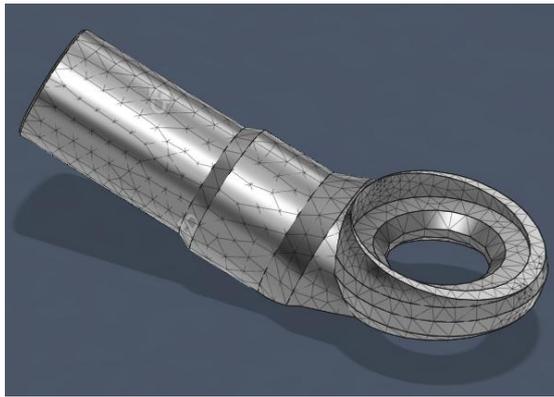


Рис. 8 – Модель кронштейну редуктора, з нанесеною сіткою кінцевих елементів

#### Аналіз результатів дослідження.

Результатом моделювання навантаження кронштейну в програмі QForm є така картина розподілення інтенсивності напружень при навантаженні 60000 Н, як зображено на рисунку 9:

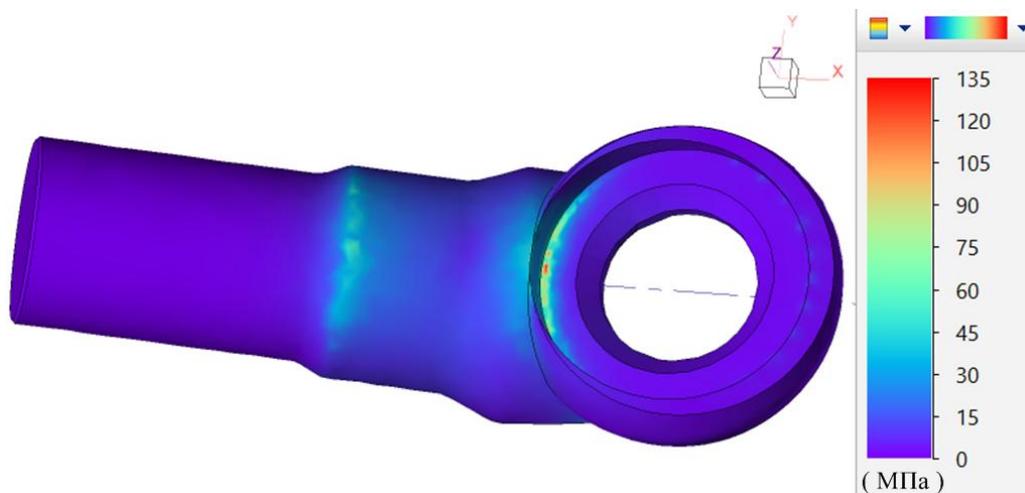


Рис. 9 – Результати моделювання інтенсивності напружень в програмі QForm

Як видно з розподілення напружень на кронштейні найбільші напруження концентруються біля основи провущини, а також в місці, де проходить зварне з'єднання кронштейна з поперечною балкою рами візка, що більш детально показано на рисунку 10.

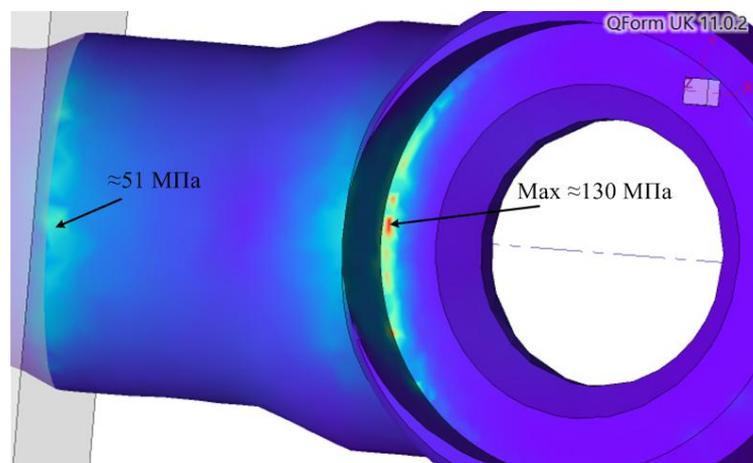


Рис. 10 – Розподілення найбільших напружень у деталі

В результаті моделювання кронштейна редуктора за допомогою програмного забезпечення Fusion отримуємо напруження, величини яких зображено на рисунку 11.

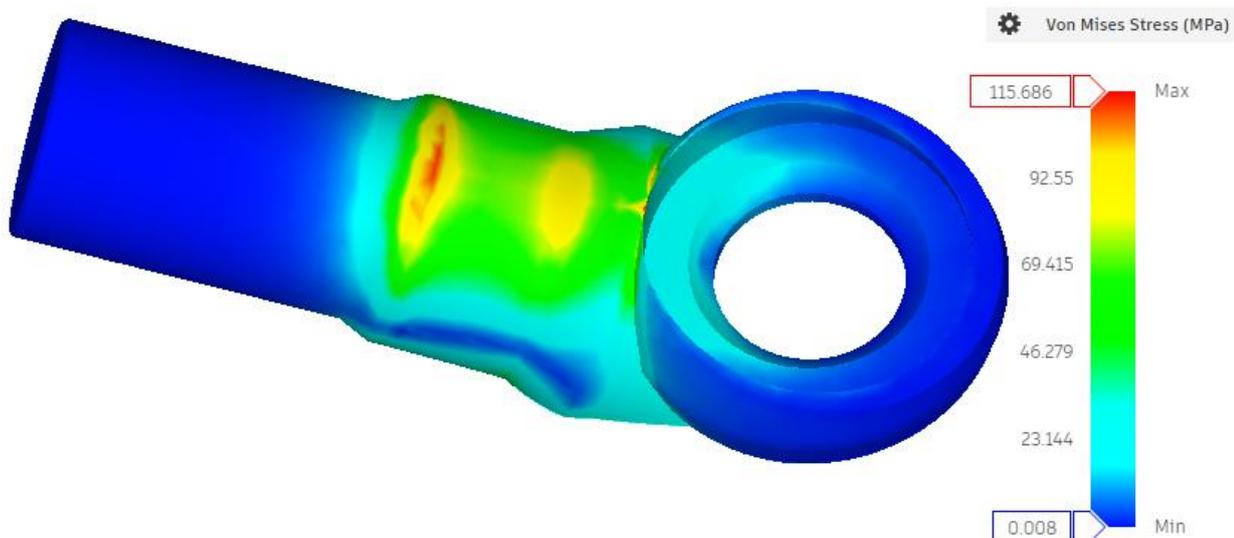


Рис. 11 – Результат моделювання кронштейну за допомогою модуля Simulation/Static Stress

Після моделювання видно, що максимальні напруження концентруються в місці поєднання провухини з циліндричною частиною кронштейна, а також в місці кріплення кронштейну до поперечної балки рами візка (рисунок 12).

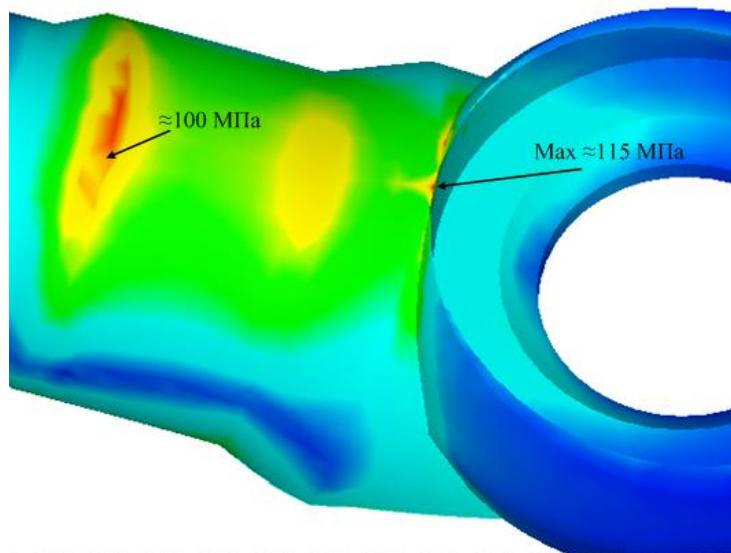


Рис. 12 – Найбільші напруження, що виникають при моделюванні у Fusion

Виходячи з порівняння отриманих результатів від моделювання в QForm та Fusion можна відзначити: обидві програми дали приблизно однакові картини розподілення напружень при деформації кронштейна від дії вказаного навантаження; Fusion показав дещо нижчі максимальні напруження біля провухини в порівнянні з QForm та вищі в зоні кріплення циліндричної частини кронштейну.

**Висновки.** На основі проведеного моделювання та аналізу його результатів можна зробити такі висновки:

1. Комплекс програм QForm працює переважно в пластичній зоні деформації металу. Він створений для досліджень технологічних процесів обробки металів тиском та інших процесів

формозміни металу. Оскільки відбувалося моделювання пружної деформації програма QForm дала певну відмінність результатів моделювання в порівнянні з Fusion Simulation.

2. Деяка відмінність отриманих результатів зумовлена застосуванням різних підходів до завдання навантаження на кронштейн – у випадку QForm було застосовано ковочний маніпулятор та гідравлічний пресс, який має свої специфічні характеристики передачі заданої величини навантаження на провусину кронштейну. Для завдання навантаження у Fusion – була вказана задана величина сили, що діє на поверхню циліндричної шайби.

Та все ж таки обидва програмні комплекси показали схожі результати розподілу напружень, що виникають при дії заданого навантаження на кронштейн кріплення редуктора візка вагону метрополітену.

#### Список літератури:

1. Конструкція та динаміка електричного рухомого складу: підручник / С. В. Панченко, М. М. Бабаєв, В. С. Блиндюк та ін. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Ч. 1. 280 с., рис. 100, табл. 14.
2. Правила технічної експлуатації метрополітенів України. Харків, 2015. 304 с.
3. Навчальний посібник по вивченню улаштування та роботи електричного, пневматичного та механічного обладнання вагонів метрополітену серії 81 - 717 та 81 – 714. КП «Київський метрополітен». Київ. 2005. 60 с.
4. Артеменко А. В., Чепурненко І. В., Мазанько Д. Г. Аналіз повреждених рам тележек вагонів метрополітену. *Збірник наукових праць ДП «УкрНДІВ»*. Рейковий рухомий склад. 2012. Вип. 6. С. 29-33.
5. Kyratsis P., Kakoulis K., Marcopoulos A. *Advances in CAD/CAM/CAE Technologies*. Machines. 2020. Vol. 8. Article 13. DOI: 10.3390/machines8010013. (дата звернення 03.09.2025).
6. Петров О. В., Піонткевич О. В., Буда А. Г., Коломієць В. С. Застосування CAD/CAE-системи SOLIDWORKS у задачах аналізу міцності деталей верстатних пристосувань. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024, №1(19). С. 95-102. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-95-102>. (дата звернення 04.09.2025).
7. Тарасов О. Ф., Васильєва Л. В., Грибков Е. П., Мирошніченко Д. В. Прогнозування напружено-деформованого стану заготовки для нового методу інтенсивної пластичної деформації з використанням сае-системи та нейронної мережі. *Обробка матеріалів тиском*. 2023. №1(52). С. 55-63. DOI: 10.37142/2076-2151/2023-1(52)55. (дата звернення 04.09.2025).
8. Тарасов О.Ф., Алтухов О.В., Сагайда П.І., Васильєва Л.В., Аносов В.Л. Автоматизоване проектування і виготовлення виробів із застосуванням CAD/CAM/CAE-систем: монографія. Краматорськ: ЦТРІ «Друкарський дім». 2017. 239 с. ISBN 978-966-379-772-4.
9. Movrin D., Plančak M., Vilotić D., Milutinović M., Skakun P., Lužanin O., Trbojević I. Optimization and design of multistage hot forging processes by numerical simulation and experimental verification. *Journal for Technology of Plasticity*. 2010. Vol. 35. Number 1-2. Pp. 75-89. (дата звернення 04.09.2025).
10. Велика О. Т., Ляковська С. Є., Тодавчич В. І. Оптимізація етапів моделювання та візуалізації виробів машинобудування. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. т. 28, №10. С. 124-128. DOI: 10.15421/40281024. (дата звернення 04.09.2025).
11. Pao A. M. Applications of finite elements method (FEM) - an overview // *Proceedings of the International Conference on Mathematical Sciences*. 2012. Pp. 101–105. DOI: 10.13140/RG.2.2.36294.42565. (дата звернення 04.09.2025).
12. Дубенець В.Г., Хільчевський В.В., Савченко О.В. Основи методу скінченних елементів: Навчальний посібник. Чернігів: ЧДТУ. 2007. 288 с.
13. Губський С. О., Чухліб В. Л., Біба М. В., Окунь А. О., Басова Є. В. Порівняння результатів моделювання прокатки в різних САЕ-системах. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ"*: зб. наук. пр. Сер.: Технології в машинобудуванні. Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 19 (1344). С. 69-72.
14. Губський С. О., Цебрєнко М.В., Окунь А.О. Дослідження напруженого деформованого стану металоконструкції стенду механізму підйому вантажу. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ"*: зб. наук. пр. Сер.: Технології в машинобудуванні. Харків: НТУ "ХПІ", 2018. № 6 (1282). С. 50-54.
15. Stebunov S., Biba N. QForm software created for technologists. *Kuzn.-Shtamp.Proizv.* 2004. No. 9. Pp. 38 – 42.

#### References (transliterated):

1. Konstruktsiia ta dynamika elektrychnoho rukhomoho skladu [Design and dynamics of electric rolling stock]: pidruchnyk / S. V. Panchenko, M. M. Babaiev, V. S. Blyndiuk ta in. Kharkiv: UkrDUZT. 2018. Ch. 1. 280 p., rys. 100, tabl. 14.
2. *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii metropoliteniv* [Rules for the technical operation of subways in Ukraine], 2015. Kharkiv.

3. *Navchalnyi posibnyk po vyvchenniu ulashtuvannia ta roboty elektrychnoho, pnevmatychnoho ta mekhanichnoho obladdannia vahoniv metropolitenu serii 81 - 717 ta 81 – 714.* [A textbook for studying the arrangement and operation of electrical, pneumatic and mechanical equipment of subway cars of the 81-717 and 81-714 series.], 2005. Kyiv.
4. Artemenko A. V., Chepurnenko Y. V. and Mazanko D. H. Analiz povrezhdenyi ram telezhek vahoniv metropolitena [Analysis of damage to bogie frames of metro cars]. *Zbirnyk naukovykh prats DP «UkrNDIV» [Collection of scientific papers of the State Enterprise "UkrNDIV"]*. 2012. Issue 6, pp. 29-33.
5. Kyratsis P., Kakoulis K., Marcopoulos A. *Advances in CAD/CAM/CAE Technologies. Machines.* 2020. Vol. 8. Article 13. DOI: 10.3390/machines8010013.
6. Petrov O. V., Piontkevych O. V., Buda A. H., Kolomiets V. S. Zastosuvannia CAD/CAE-systemy SOLIDWORKS u zadachakh analizu mitsnosti detalei verstatnykh prystosovan [Application of the SOLIDWORKS CAD/CAE system in strength analysis tasks for machine tool parts.]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transport [Bulletin of Mechanical Engineering and Transport]*. 2024. No 1 (19). Pp. 95-102. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-95-102>.
7. Tarasov O. F., Vasylieva L. V., Hrybkov E. P., Myroshnychenko D. V. Prohnozuvannia napruzhenno-deformovanoho stanu zahotovky dlia novoho metodu intensyvnoi plastychnoi deformatsii z vykorystanniam cae-systemy ta neironnoi merezhi [Prediction of the stress-strain state of a workpiece for a new method of intensive plastic deformation using the CAE system and a neural network]. *Obrobka materialiv tyskom [Pressure processing of materials]*. 2023. No 1(52). Pp. 55-63. DOI: 10.37142/2076-2151/2023-1(52)55.
8. Tarasov O.F., Altukhov O.V., Sahaida P.I., Vasylieva L.V., Anosov V.L. Avtomatyzovane proektuvannia i vyhotovlennia vyrobiv iz zastosuvanniam CAD/CAM/CAE-system [Automated design and manufacturing of products using CAD/CAM/CAE systems]: monohrafiia. Kramatorsk: TsTRI «Drukarskyi dim». 2017. 239 p. ISBN 978-966-379-772-4.
9. Movrin D., Plančak M., Vilotić D., Milutinović M., Skakun P., Lužanin O., Trbojević I. Optimization and design of multistage hot forging processes by numerical simulation and experimental verification. *Journal for Technology of Plasticity*. 2010. Vol. 35. Number 1-2. Pp. 75-89.
10. Velyka O. T., Liaskovska S. E. and Todavchuch V. I. (2018). Optimization of the stages of modeling and visualization of machine building products. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(10), 124-128. DOI: 10.15421/40281024.
11. Pao A. M. Applications of finite elements method (FEM) - an overview // *Proceedings of the International Conference on Mathematical Sciences*. 2012. Pp. 101–105. DOI: 10.13140/RG.2.2.36294.42565.
12. Dubenets V.H., Khilchevskiy V.V., Savchenko O.V. Osnovy metodu skinchennykh elementiv [Fundamentals of the finite element method]: Navchalnyi posibnyk. Chernihiv: ChDTU. 2007. 288 p.
13. Hubskeyi S. O., Chukhlib V. L., Biba M. V., Okun A. O., Basova Ye. V. Porivniannia rezultativ modeliuvannia prokatky v riznykh CAE-systemakh [Comparison of rolling simulation results in different CAE systems]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI": zb. nauk. pr. Ser.: Tekhnolohii v mashynobuduvanni [Bulletin of the National Technical University "KhPI": collection of scientific works. Ser.: Technologies in mechanical engineering.]*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2019. No 19 (1344). Pp. 69-72.
14. Hubskeyi S. O., Tsebrenko M.V., Okun A.O. Doslidzhennia napruzhenoho deformovanoho stanu metalokonstruktsii stendu mekhanizmu pididomu vantazhu [Investigation of the stressed deformed state of the metal structure of the load lifting mechanism stand]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI": zb. nauk. pr. Ser.: Tekhnolohii v mashynobuduvanni. [Bulletin of the National Technical University "KhPI": collection of scientific works. Ser.: Technologies in mechanical engineering.]* Kharkiv: NTU "KhPI". 2018. No 6 (1282). Pp. 50-54.
15. Stebunov S., Biba N. QForm software created for technologists. *Kuzn.-Shtamp.Proizv.* 2004. No 9. Pp. 38 – 42.

*Надійшла (received) 18.11.2025*

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Бірюков Сергій Віталійович (Biriukov Serhii)** - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6403-5880>, e-mail: [Serhii.Biriukov@mit.khpi.edu.ua](mailto:Serhii.Biriukov@mit.khpi.edu.ua).

**Губський Сергій Олександрович (Hubskeyi Serhii)** - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском, м. Харків; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; e-mail: [gubskiyso@gmail.com](mailto:gubskiyso@gmail.com).