

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-39>

УДК 621.336.4:621.762:519.6

КОВТУН ОЛЕКСІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0000-6036-6723>

e-mail: alkovt1982@gmail.com

БАБАК ОЛЕГ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1068-0631>

e-mail: babako@khmnu.edu.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ КОНТАКТНИХ ВСТАВОК ТРОЛЕЙБУСА З ГРАФІТОПЛАСТОВИХ КОМПОЗИЦІЙ

У роботі досліджено процес пресування контактної вставки троллейбуса з графітопластової порошкової композиції з використанням тривимірного чисельного моделювання методом скінченних елементів. Об'єктом дослідження є базова конструкція контактної вставки серійного виробництва, що застосовується в системах струмознімання електричного транспорту. Чисельні експерименти виконано з використанням відкритого програмного комплексу Code_Aster, який дозволяє враховувати нелінійну поведінку матеріалу, великі деформації та контактну взаємодію з тертям. Основну увагу приділено аналізу розподілу відносної щільності матеріалу, полів швидкостей течії графітопластової композиції та характеру зміни зусилля пресування впродовж усього циклу ущільнення. Показано, що геометрія базової конструкції вставки зумовлює формування зон зниженої щільності, локальних областей циркуляції матеріалу та різке зростання зусилля на фінальній стадії пресування. Отримані результати можуть бути використані як наукове обґрунтування для подальшої конструктивної модифікації контактної вставки з метою підвищення її експлуатаційної довговічності.

Ключові слова: контактна вставка троллейбуса, графітопласт, пресування, чисельне моделювання, Code_Aster, щільність, поле швидкостей.

KOVTUN OLEKSIJ, BABAK OLEH

Khmelnytskyi National University

MODELING OF THE PRESSING PROCESS OF TROLLEYBUS CONTACT INSERTS FROM GRAPHITE-PLASTIC COMPOSITIONS

The work investigates the process of pressing a trolleybus contact insert from a graphite-plastic powder composition using three-dimensional numerical modeling by the finite element method. The object of the study is the basic design of a mass-produced contact insert used in current collection systems of electric transport.

Most current research on current collection systems for electric vehicles focuses on the analysis of wear of contact inserts during operation, as well as on how operating conditions and material composition affect the durability of the contact pair "insert-wire". On the other hand, the problems associated with the formation of structural heterogeneity of contact inserts at the manufacturing stage remain insufficiently studied. In particular, the influence of the geometry of the main structure on the movement process remains unexplored. This limits the possibilities of consciously improving the design of inserts and optimizing their manufacturing technology. In this regard, it is important to study the process of movement of the main structure of the trolleybus contact insert, which is used in serial production. For this, it is necessary to use modern methods of numerical analysis. Such a method not only allows to explain the reasons for the structural heterogeneity of the material, but also creates a basis for further improvements in the design of the insert, taking into account operational and technological conditions.

Numerical experiments were performed using the open software package Code_Aster, which allows taking into account nonlinear material behavior, large deformations and contact interaction with friction. The main attention was paid to the analysis of the distribution of the relative density of the material, the flow velocity fields of the graphite-plastic composition and the nature of the change in the pressing force throughout the entire compaction cycle. It was shown that the geometry of the basic design of the insert causes the formation of zones of reduced density, local areas of material circulation and a sharp increase in force at the final stage of pressing. The results obtained can be used as a scientific justification for further constructive modification of the contact insert in order to increase its operational durability.

Keywords: trolleybus contact insert, graphite-plastic composite, pressing, numerical simulation, Code_Aster, density distribution, velocity field.

Стаття надійшла до редакції / Received 23.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 16.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Ковтун Олексій, Бабак Олег

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Контактні вставки струмознімників троллейбусів (рис.1) є ключовими елементами системи струмознімання, від надійності яких безпосередньо залежить стабільність електричного контакту, рівень зношування контактної вставки та загальна ефективність експлуатації електричного транспорту. У процесі роботи контактні вставки зазнають одночасної дії механічного тертя, електричних струмів високої густини та теплових навантажень, що зумовлює складний характер їх зношування та деградації матеріалу. Практика експлуатації показує, що навіть за дотримання рекомендованих режимів роботи ресурс контактних вставок часто є обмеженим, а передчасний вихід з ладу окремих виробів має системний характер.

Однією з основних причин зниження довговічності контактних вставок є структурна неоднорідність матеріалу, сформована ще на стадії виготовлення. Зокрема, локальне зниження щільності графітопластової композиції, підвищена пористість або наявність ослаблених зон у приповерхневих ділянках можуть призводити до інтенсифікації зношування, утворення тріщин і руйнування вставок у процесі експлуатації. Такі дефекти, як

правило, не є наслідком умов струмознімання, а формуються внаслідок особливостей технології пресування та геометрії виробу.



Рис. 1. Нова і зношена вставка тролейбуса

Технологія пресування є визначальною для формування фізико-механічних і трибологічних властивостей графітопластових контактних вставок. У процесі ущільнення порошкової композиції відбувається складна взаємодія між частинками графіту та зв'язуючою фазою, а також їх контакт із поверхнями прес-інструменту. Геометрія вставки, наявність бортів, заглиблень і різких переходів форми істотно впливають на кінематику течії матеріалу, рівномірність ущільнення та характер розподілу напружень. У результаті в окремих зонах виробу можуть формуватися області зниженої щільності, які надалі стають осередками прискореного зносу.

Більшість існуючих досліджень у галузі струмознімальних систем електротранспорту зосереджені переважно на аналізі експлуатаційного зношування контактних вставок, впливі матеріального складу та умов роботи на довговічність контактної пари «вставка–провід». Водночас питання формування структурної неоднорідності контактних вставок на стадії виготовлення, зокрема вплив геометрії базової конструкції на перебіг процесу пресування, залишаються недостатньо дослідженими. Це обмежує можливості цілеспрямованого удосконалення конструкції вставок та оптимізації технології їх виготовлення.

Ефективним інструментом аналізу процесів ущільнення порошкових і пористих матеріалів є чисельне моделювання методом скінченних елементів. Застосування тривимірних FEM-моделей дозволяє досліджувати розподіл відносної щільності, поля швидкостей течії матеріалу та силові параметри процесу пресування без проведення трудомістких і дорогих експериментів. Особливо важливим є використання чисельного моделювання на ранніх етапах проектування, коли необхідно виявити проблемні зони конструкції та сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо її подальшої модифікації.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження процесу пресування базової конструкції контактної вставки тролейбуса, що застосовується у серійному виробництві, з використанням сучасних методів чисельного аналізу. Такий підхід дозволяє не лише пояснити причини формування структурної неоднорідності матеріалу, але й створити підґрунтя для подальшого удосконалення конструкції вставки з урахуванням реальних технологічних і експлуатаційних умов.

Аналіз досліджень та публікацій

Елементи струмознімання електротранспорту працюють у режимі одночасної дії механічного тертя, електричного контакту та тепловиділення, тому довговічність контактних матеріалів визначається не лише їхнім складом, але й якістю формування структури при виготовленні. Дослідження експлуатаційного зношування контактних проводів тролейбуса показують, що геометричні та механічні характеристики поверхневих шарів істотно змінюються в процесі роботи, а формування «графітової плівки» та контактних трибошарів є важливим механізмом стабілізації тертя і зносу [1]. Для вуглецевих/карбоневих контактних вставок (стрічок, накладок) у залізничних системах акцент робиться на дефектах матеріалу та їхньому зв'язку з аварійними пошкодженнями контактної пари «накладка–провід», що підкреслює важливість однорідності матеріалу і відсутності зон ослаблення [2]. Аналогічно, для «ненормального» зношування карбоневих контактних вставок у pantograph–catenary системах показано мультифакторний характер проблеми (трибологія, динаміка контакту, електричні явища), що ускладнює прогноз і посилює вимоги до стабільності властивостей матеріалу [3]. Підходи до прогнозування зносу контактних вставок розвиваються у напрямку комбінування механістичних моделей і даних експлуатації [4]. В роботах з тематики струмознімальних елементів електротранспорту наголошено на значенні правильного вибору матеріалів та модифікації композицій для зниження тертя і зносу, а також розглянуто підходи до створення композиційних матеріалів на основі графіту та металографітних систем [5]. Окремо показано прикладні аспекти виготовлення графітовмісних електроконтактних вставок (зокрема з використанням вторинної сировини), що підтверджує актуальність задачі оптимізації технології формування та ущільнення [6]. Ці праці створюють регіональний науковий контекст і підсилюють прикладну спрямованість досліджень вставок саме для електротранспорту.

У частині моделювання процесів ущільнення порошкових/пористих композицій чисельні методи (FEM) є базовими для аналізу розподілу відносної щільності, полів швидкостей деформації та впливу тертя

«порошок–інструмент». Класичні підходи 3D моделювання компактування порошків із використанням сар/конус-кап моделей пластичності демонструють здатність прогнозувати неоднорідність ущільнення у виробках складної форми [7]. Сучасніші роботи з FE-аналізу ущільнення (зокрема із модифікованими критеріями текучості для пористих матеріалів) напряду орієнтовані на отримання карти відносної щільності та аналіз патернів течії матеріалу [8]. Значний вплив на результат має контактне тертя; експериментально та модельно показано, що кулонівський коефіцієнт тертя на межі «порошок–матриця» може стартувати біля 0,2 і змінюватися з нормальним тиском/швидкістю, а також потребує коректного підбору для реалістичного прогнозу розподілу щільності [9]. Практична реалізація таких задач часто виконується в спеціалізованих системах технологічного моделювання, які застосовують для аналізу процесів формоутворення й течії матеріалу у 2D/3D постановках, що робить їх придатними для задачі пресування контактних вставок з композицій [10].

Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є дослідження процесу пресування контактної вставки тролейбуса з графітопластової композиції шляхом тривимірного чисельного моделювання для виявлення причин нерівномірного ущільнення матеріалу та формування інженерних передумов для подальшої конструктивної модифікації вставки з метою підвищення її експлуатаційної довговічності.

Виклад основного матеріалу

Об'єктом дослідження є контактна вставка тролейбуса базової конструкції (рис.1), виготовлена методом пресування з графітопластової порошкової композиції. Геометрія вставки відповідає серійному виконанню, що застосовується в практиці експлуатації електричного транспорту. Чисельне моделювання виконувалося з метою аналізу процесу ущільнення матеріалу та виявлення конструктивно зумовлених зон нерівномірної щільності.

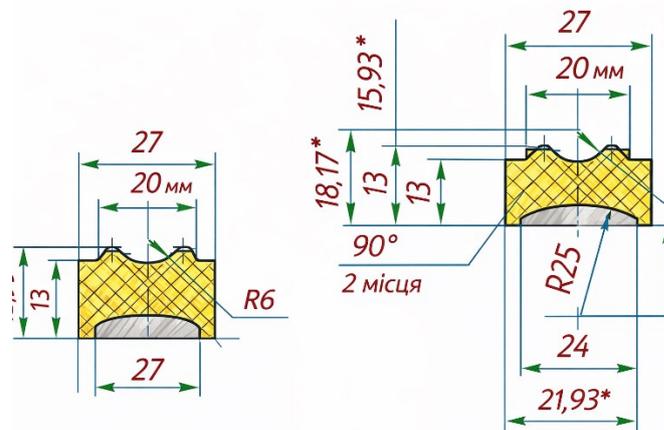


Рис. 2. Геометрія робочої частини вставки тролейбуса

Матеріалом досліджуваної контактної вставки є графітопластова композиція, що широко застосовується у струмознімальних елементах електричного транспорту. У даній роботі розглядалися контактні вставки серійного виробництва фірми ЛЕГ, які експлуатуються в системах струмознімання тролейбусів. Використання серійних виробів дозволяє безпосередньо пов'язати результати чисельного аналізу з реальними умовами виготовлення та експлуатації контактних елементів.

Графітопластова композиція складається з 85 % мас. графіту та 15 % мас. фенолформальдегідної смоли, яка виконує роль зв'язуючого компонента. Такий склад забезпечує поєднання необхідної електропровідності, достатньої механічної міцності та прийнятних трибологічних властивостей, що є критичними для контактних вставок, які працюють в умовах інтенсивного тертя та електричного навантаження. Початкова відносна щільність порошкової маси перед пресуванням становила $\rho_0 = 0,65$, що відповідає типовим технологічним параметрам для подібних матеріалів.

Слід зазначити, що графітопластові композиції характеризуються складною поведінкою в процесі ущільнення, зумовленою поєднанням крихкого графітового наповнювача та полімерного зв'язуючого. У процесі пресування ущільнення матеріалу відбувається за рахунок зменшення міжчасткової пористості, перерозподілу графітових частинок і локальної пластичної деформації зв'язуючої фази. У зв'язку з цим рівномірність ущільнення значною мірою залежить не лише від складу матеріалу, але й від геометрії виробу та умов контакту з прес-інструментом.

Використання у дослідженні серійних вставок фірми ЛЕГ дозволяє розглядати отримані результати як репрезентативні для реальних виробів, а виявлені закономірності — як такі, що мають практичну цінність для подальшого удосконалення конструкції та технології виготовлення контактних вставок тролейбуса.

Розрахункова модель включала заготовку контактної вставки, матрицю та пуансон. Заготовка моделювалася як деформівне тіло з нелінійними властивостями, тоді як матриця та пуансон вважалися абсолютно жорсткими, що є обґрунтованим припущенням з огляду на значну різницю між жорсткістю прес-інструменту та графітопластової композиції. Просторова дискретизація заготовки здійснювалася з

використанням тривимірної сітки скінченних елементів, достатньо дрібною для коректного відтворення напружено-деформованого стану та локальних особливостей течії матеріалу.

Чисельне дослідження процесу пресування контактної вставки виконано з використанням відкритого програмного комплексу Code_Aster, який реалізує метод скінченних елементів для розв'язання нелінійних задач механіки деформівного твердого тіла з урахуванням великих деформацій та контактної взаємодії. Моделювання проводилося у тривимірній постановці з заданням умов сухого тертя між заготовкою та прес-інструментом. Заготовка описувалася сіткою з приблизно 35 000 шестивузлових кінцевих елементів з однією точкою інтегрування. Матриця та пуансон вважалися абсолютно жорсткими тілами.

Контактну взаємодію між заготовкою та інструментом описано законом тертя Кулона–Амонтона з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,2$. Максимальне зусилля на пуансоні становило 4,95 МН, швидкість його переміщення — 20 мм/с. Загальна тривалість процесу пресування складала 0,5–0,6 с. Як основні критерії оцінки ефективності конструкцій використовувалися рівномірність розподілу відносної щільності матеріалу та характер поля швидкостей течії порошкової маси. Значення коефіцієнта тертя приймалося сталим і відповідало характерним умовам пресування графітовмісних композицій. Навантаження на заготовку задавалося у вигляді керованого переміщення пуансона зі сталою швидкістю, що дозволило відтворити повний цикл ущільнення матеріалу від початкового стану до фінальної стадії пресування.

Аналіз результатів чисельного моделювання розподілу відносної щільності матеріалу (рис. 3) показав, що процес пресування базової конструкції контактної вставки супроводжується формуванням суттєво неоднорідної структури по її поперечному перерізу. Отримані карти відносної щільності свідчать про наявність зон з різним ступенем ущільнення, що безпосередньо пов'язано з геометрією формуютьорожнини та особливостями течії графітопластової композиції під дією зовнішнього навантаження.

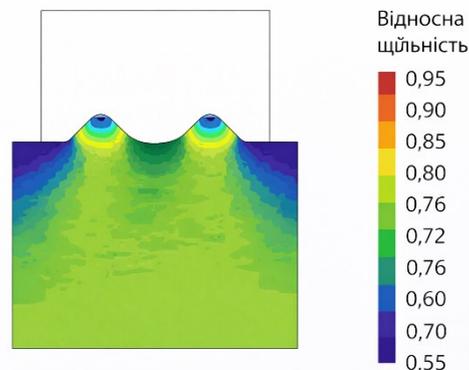


Рис. 3. Розподіл відносної щільності матеріалу вставок

У центральній частині вставки спостерігаються значення відносної щільності, близькі до граничних для даного матеріалу, що свідчить про ефективне ущільнення порошкової маси на цій ділянці. Це пояснюється відносно вільними умовами деформування та можливістю рівномірного перерозподілу матеріалу вздовж осі пресування. Водночас у приповерхневих зонах, що безпосередньо контактують з матрицею, відносна щільність є дещо нижчою, що зумовлено впливом сил тертя, які обмежують переміщення матеріалу та зменшують інтенсивність його ущільнення.

Найбільш виражена неоднорідність розподілу щільності виявлена в області буртів та локальних заглиблень робочої частини вставки. У цих зонах за результатами моделювання спостерігається зниження відносної щільності порівняно з основним об'ємом заготовки. Така особливість пов'язана з тим, що на пізніх стадіях пресування основна маса матеріалу вже досягає високого ступеня ущільнення, тоді як матеріал у зонах складної геометрії перебуває в умовах обмеженого притоку і не може бути ефективно доущільнений без значного зростання зусилля пресування. Формування локальних зон зниженої щільності має важливе інженерне значення, оскільки саме ці ділянки потенційно є найбільш уразливими в умовах експлуатації контактної вставки. Підвищена пористість у зоні буртів може призводити до локального зниження механічної міцності, інтенсифікації зношування та прискореного руйнування матеріалу при дії контактних і термічних навантажень у процесі струмознімання. Отримані результати розподілу відносної щільності тісно корелюють з характером кривої зусилля пресування та полем швидкостей течії матеріалу. Зокрема, зони зниженої щільності відповідають ділянкам, у яких у подальшому спостерігається різке зростання зусилля пресування та формування локальних зон уповільненого або циркуляційного руху матеріалу. Це підтверджує комплексний характер впливу геометрії вставки на перебіг процесу ущільнення та свідчить про необхідність урахування взаємозв'язку між розподілом щільності, кінематикою течії та силовими параметрами пресування.

Аналіз кривої зусилля пресування (рис.4) для конструкції контактної вставки показав характерну нелінійну зміну навантаження впродовж усього циклу формування. На початковій стадії процесу спостерігається відносно плавне зростання зусилля, що відповідає етапу ущільнення порошкової маси за рахунок її перерозподілу та заповнення основного об'єму формуютьорожнини. На цьому етапі деформація матеріалу відбувається переважно за рахунок зменшення пористості без значного опору з боку прес-інструменту.

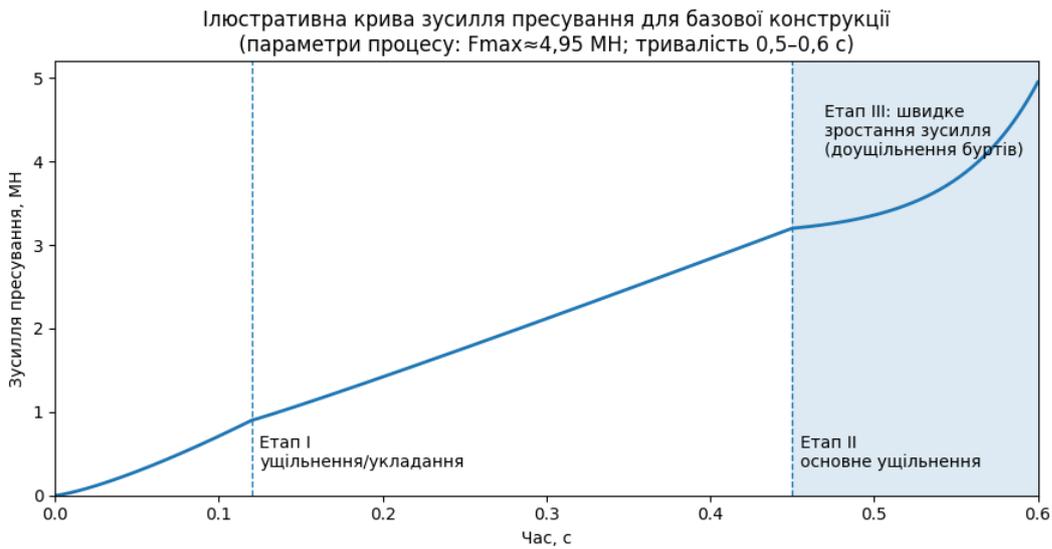


Рис. 4. Зусилля пресування

У середній частині циклу пресування зусилля зростає більш інтенсивно, що пов'язано з переходом процесу до стадії основного ущільнення. На даному етапі графітопластова композиція зазнає значних пластичних деформацій, а контакт між заготовкою та поверхнями матриці стає більш розвиненим. Зростання тертя та обмеження вільної течії матеріалу призводять до підвищення опору деформуванню і, відповідно, до зростання навантаження на пуансон. Найбільш вираженою особливістю кривої зусилля пресування є різке зростання навантаження на завершальній стадії процесу. Це зростання пов'язане з необхідністю доущільнення матеріалу в локальних зонах складної геометрії, зокрема в області буртів і заглиблень робочої частини вставки, після досягнення високого ступеня ущільнення в основному об'ємі заготовки. У цих зонах можливості перерозподілу матеріалу є обмеженими, що зумовлює локальну концентрацію напружень і різке збільшення зусилля пресування. Виявлений характер зміни навантаження свідчить про нерациональний перебіг процесу ущільнення для базової конструкції контактної вставки. Зокрема, значні пікові значення зусилля на фінальній стадії можуть негативно впливати як на енергетичну ефективність процесу пресування, так і на стабільність формування структури матеріалу. Отримані результати вказують на доцільність конструктивної модифікації геометрії вставки з метою зменшення локального доущільнення та зниження максимальних навантажень у кінці процесу пресування.

Аналіз поля швидкостей течії матеріалу (рис. 5) дозволив детально дослідити кінематику деформування графітопластової композиції в процесі пресування базової конструкції контактної вставки. Отримані результати показують, що швидкісні характеристики руху матеріалу є суттєво неоднорідними по об'єму заготовки та значною мірою визначаються геометрією формуючої порожнини.

У центральній частині вставки спостерігається відносно впорядкований характер течії матеріалу, спрямований уздовж осі пресування. Тут швидкості деформування є помірними та забезпечують ефективне ущільнення порошкової маси. Натомість у приповерхневих зонах, що контактують з матрицею, швидкості руху матеріалу істотно знижуються внаслідок дії сил тертя, що призводить до формування градієнтів швидкості та нерівномірного перебігу процесу деформації.

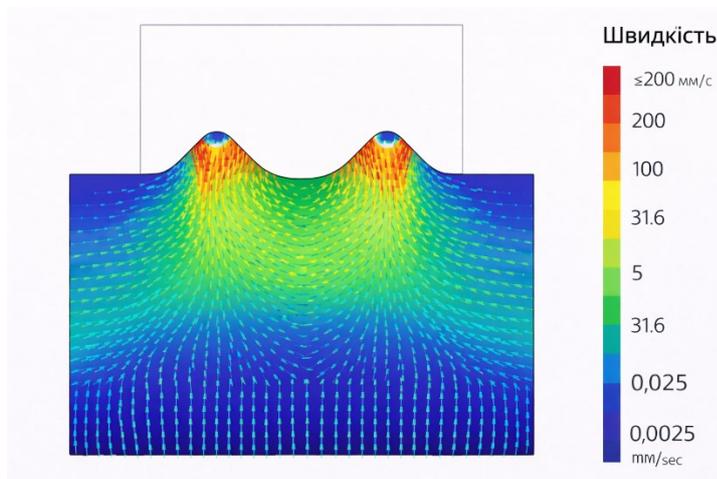


Рис. 5. Поле швидкостей течії матеріалу вставок

Особливу увагу привертають зони в області буртів, де за результатами моделювання формуються локальні області циркуляції та уповільненого руху матеріалу. У цих зонах напрямки векторів швидкостей змінюються, що свідчить про складний характер течії з елементами зсувного деформування. Наявність таких зон ускладнює ефективне ущільнення графітопластової композиції та сприяє збереженню підвищеної пористості в локальних ділянках вставки.

Формування зон циркуляції та застою матеріалу безпосередньо пов'язане з геометричними особливостями базової конструкції вставки. Вузькі перерізи та різкі переходи форми обмежують можливість вільного перетікання порошкової маси, що призводить до локального накопичення деформацій і нерівномірного розподілу швидкостей. У подальшому це може спричинити формування структурної неоднорідності матеріалу, яка негативно впливає на механічні та трибологічні властивості контактної вставки в умовах експлуатації.

Отримані результати аналізу поля швидкостей підтверджують доцільність використання чисельного моделювання як інструмента для виявлення проблемних зон течії матеріалу на стадії проектування. Виявлені закономірності можуть бути використані як наукове обґрунтування для подальшої модифікації геометрії контактної вставки з метою усунення зон циркуляції, забезпечення більш рівномірної течії матеріалу та підвищення однорідності ущільнення графітопластової композиції.

Отримані результати чисельного моделювання переконливо підтверджують, що геометрія базової конструкції контактної вставки тролейбуса є визначальним фактором, який впливає на перебіг процесу ущільнення графітопластової композиції, формування поля швидкостей течії матеріалу та характер зміни зусилля пресування. Виявлені зони зниженої відносної щільності, локальні області циркуляції матеріалу та різке зростання навантаження на завершальній стадії пресування мають чітко виражену конструктивну природу і не є випадковими особливостями чисельного розрахунку.

Більшість робіт, присвячених контактним елементам електротранспорту, зосереджуються переважно на експлуатаційних аспектах зношування та деградації матеріалу в умовах струмознімання. Зокрема, у [1–4] детально аналізуються механізми зносу контактної пари «вставка–провід», а також вплив дефектів матеріалу та умов експлуатації на довговічність вставок. Проте у цих дослідженнях структура контактних вставок розглядається як задана, а питання формування її неоднорідності на стадії виготовлення фактично не аналізуються. Таким чином, джерела [1–4] не дають відповіді на питання, яким чином геометрія вставки та параметри пресування формують початкові зони ослаблення матеріалу, що в подальшому можуть ініціювати прискорене зношування. У роботах [5,6] наголошується на важливості вибору матеріалу та технологічних підходів до виготовлення струмознімальних елементів, зокрема графітовмісних та металографітних композицій. Водночас навіть у цих працях основна увага приділяється складу матеріалу, модифікації композиції або відновлювальним технологіям, тоді як вплив геометрії конкретної конструкції вставки на рівномірність ущільнення залишається поза межами детального аналізу. Це підкреслює актуальність результатів даної роботи, де геометричний фактор розглядається як ключовий елемент формування структури матеріалу. З позицій теорії пресування порошкових матеріалів отримані результати узгоджуються з класичними уявленнями про нерівномірність ущільнення у виробках складної форми. У роботах [7–9] показано, що навіть за оптимально підібраних матеріальних моделей і параметрів тертя локальні особливості геометрії можуть призводити до формування зон недоущільнення та підвищених градієнтів напружень. Однак більшість таких досліджень орієнтовані на абстрактні або типові зразки (циліндри, кільця, прості профілі) і не враховують специфіку контактних вставок електротранспорту з характерними буртами та заглибленнями. У цьому контексті результати даної роботи доповнюють наявні підходи, демонструючи, як загальні закономірності порошкового ущільнення проявляються у конкретній інженерній конструкції. Важливою особливістю представленого дослідження є те, що воно не спрямоване на безпосередню оптимізацію або порівняння кількох конструктивних варіантів. Розглянуто лише базову конструкцію контактної вставки, що слід вважати як перевагою, так і обмеженням роботи. З одного боку, це дозволило глибоко проаналізувати механізми формування неоднорідності ущільнення без впливу додаткових змінних. З іншого боку, результати не дають кількісної оцінки ефекту можливих конструктивних модифікацій і потребують подальшого розвитку.

До недоліків дослідження також слід віднести використання спрощеної моделі тертя та відсутність прямої валідації результатів за експериментальними даними з розподілу щільності в реальних вставках. Водночас варто зазначити, що подібні обмеження є типовими для початкових етапів чисельного аналізу процесів пресування і не знижують цінності отриманих якісних закономірностей.

Перспективи подальших досліджень пов'язані, по-перше, з цілеспрямованою модифікацією геометрії контактної вставки на основі виявлених проблемних зон, по-друге, з проведенням порівняльного чисельного аналізу декількох конструктивних варіантів. Окремим напрямком є експериментальна перевірка результатів моделювання шляхом вимірювання локальної щільності або пористості в різних зонах вставки та зіставлення їх з прогнозами FEM-моделі. Реалізація цих підходів дозволить перейти від якісного аналізу до кількісної оптимізації конструкції та створить передумови для підвищення експлуатаційної довговічності контактних вставок тролейбуса.

Висновки

1. У результаті тривимірного чисельного моделювання процесу пресування базової конструкції контактної вставки тролейбуса з графітопластової композиції з використанням програмного комплексу

Code_Aster встановлено, що геометрія вставки суттєво впливає на рівномірність ущільнення матеріалу. Зокрема, у зоні бurtів та локальних заглиблень формуються області зниженої відносної щільності порівняно з основним об'ємом виробу, що свідчить про структурну неоднорідність, закладену на стадії виготовлення.

2. Аналіз поля швидкостей течії матеріалу показав, що в зонах складної геометрії виникають локальні області уповільненого руху та циркуляції графітопластової композиції, обумовлені обмеженими можливостями перерозподілу матеріалу та дією сил тертя на контактних поверхнях. Наявність таких зон безпосередньо пов'язана з нерівномірністю ущільнення та може розглядатися як одна з основних причин формування ослаблених ділянок контактної вставки.

3. Дослідження характеру зміни зусилля пресування впродовж циклу ущільнення показало різке зростання навантаження на фінальній стадії процесу, що пов'язано з необхідністю доущільнення матеріалу в локальних зонах складної форми після досягнення високої щільності в основному об'ємі вставки. Такий характер навантаження свідчить про зниження енергетичної ефективності процесу пресування та підвищені вимоги до міцності прес-інструменту.

4. Отримані результати мають прикладне значення та можуть бути використані як наукове обґрунтування для подальшої конструктивної модифікації контактної вставки, спрямованої на усунення зон зниженої щільності, забезпечення більш рівномірної течії матеріалу та зменшення пікових зусиль пресування. Подальші дослідження доцільно спрямувати на порівняльний аналіз модифікованих геометричних варіантів вставок та експериментальну валідацію чисельних результатів.

Література

1. Pieniak, D., et al. (2025). Tests of operational wear of trolleybus traction wires: A case study. *Applied Sciences*, 15(23), Article 12716. <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/23/12716>
2. Kužnar, M., et al. (2023). Damage caused by material defects of carbon sliding strips in railway pantographs. *Materials*, 16(5), Article 1839. <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/5/1839>
3. Zhi, X., et al. (2025). Analysis of the abnormal wear of the pantograph carbon contact strip. *Scientific Reports*, 15, Article 28380. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-28380-0>
4. Zhou, N., et al. (2024). Contact strip of pantograph heuristic wear model and its verification. *Wear*, 530–531, Article 205286. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X24002986>
5. Kovtun, O., et al. (2023). Friction and wear of current-transmitting contact elements: Approaches to material selection. *Problems of Tribology*, 28(4), 5–13. <https://tribology.khmnu.edu.ua/index.php/ProbTrib/article/view/927>
6. Kovtun, O. S., et al. (2024). Restoration and wear resistance of electric transport sliding contacts (technology of graphite-filled inserts). *Problems of Tribology*, 29(1), 44–52. <https://tribology.khmnu.edu.ua/index.php/ProbTrib/article/download/952/1403/2603>
7. Khoei, A. R., & Azami, A. R. (2007). Computational modeling of 3D powder compaction processes. *Computational Materials Science*, 38(4), 843–856. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013606002706>
8. Liu, M., et al. (2024). Finite element analysis of densification process in high-pressure powder compaction. *Materials*, 17(13), Article 3085. <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/13/3085>
9. Staf, H., et al. (2018). Determination of the frictional behavior at compaction of powders. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(6), 2925–2934. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-018-3205-1>
10. EDF R&D & Code_Aster Community. (n.d.). *Code_Aster: Open-source finite element solver for structural mechanics*. <https://www.code-aster.org/>

References

1. Pieniak, D., et al. (2025). Tests of operational wear of trolleybus traction wires: A case study. *Applied Sciences*, 15(23), Article 12716. <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/23/12716>
2. Kužnar, M., et al. (2023). Damage caused by material defects of carbon sliding strips in railway pantographs. *Materials*, 16(5), Article 1839. <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/5/1839>
3. Zhi, X., et al. (2025). Analysis of the abnormal wear of the pantograph carbon contact strip. *Scientific Reports*, 15, Article 28380. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-28380-0>
4. Zhou, N., et al. (2024). Contact strip of pantograph heuristic wear model and its verification. *Wear*, 530–531, Article 205286. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X24002986>
5. Kovtun, O., et al. (2023). Friction and wear of current-transmitting contact elements: Approaches to material selection. *Problems of Tribology*, 28(4), 5–13. <https://tribology.khmnu.edu.ua/index.php/ProbTrib/article/view/927>
6. Kovtun, O. S., et al. (2024). Restoration and wear resistance of electric transport sliding contacts (technology of graphite-filled inserts). *Problems of Tribology*, 29(1), 44–52. <https://tribology.khmnu.edu.ua/index.php/ProbTrib/article/download/952/1403/2603>
7. Khoei, A. R., & Azami, A. R. (2007). Computational modeling of 3D powder compaction processes. *Computational Materials Science*, 38(4), 843–856. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013606002706>
8. Liu, M., et al. (2024). Finite element analysis of densification process in high-pressure powder compaction. *Materials*, 17(13), Article 3085. <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/13/3085>
9. Staf, H., et al. (2018). Determination of the frictional behavior at compaction of powders. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(6), 2925–2934. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-018-3205-1>
10. EDF R&D & Code_Aster Community. (n.d.). *Code_Aster: Open-source finite element solver for structural mechanics*. <https://www.code-aster.org/>