

**Р. І. Сивак**  
**В. С. Наляжний**

## **МІКРОМЕХАНІЧНІ АСПЕКТИ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Вінницький національний технічний університет

*Якісне ущільнення дисперсних матеріалів є критично важливим етапом для забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності кінцевого виробу. Метою даного дослідження є синтез та аналіз сучасних наукових праць, присвячених мікромеханічним механізмам ущільнення, що базуються на методі дискретних елементів (DEM) та підтверджені лабораторними випробуваннями, для визначення ключових параметрів оптимізації процесу. Результати показують, що ущільнення є процесом перегрупування та перерозподілу частинок, який призводить до заповнення пор та формування стабільного силового каркаса. Розглядається поняття "точки блокування ущільнення", яка відповідає моменту досягнення піку динамічної жорсткості матеріалу. На мікрорівні цей стан характеризується досягненням стабільної горизонтальної орієнтації близько 60% великих частинок, що свідчить про формування стійкого скелета. Досліджено негативні наслідки переущільнення, яке настає після досягнення піку динамічної жорсткості матеріалу. Подальший вплив призводить не до покращення, а до деградації матеріалу через шліфування поверхні великих частинок та руйнування сформованого каркасу, що веде до зниження механічних властивостей. Проаналізовано вплив ключових параметрів, таких як частота вібрації, тиск обтиснення та гранулометричний склад, на напружений стан і перманентну деформацію. Встановлено, що оптимізація цих параметрів дозволяє максимізувати корисну енергію ущільнення, зокрема енергію ковзання при коченні, яка є найефективнішою для дисипації. Практична цінність дослідження полягає у створенні наукової основи для розробки оптимізованих технологій ущільнення, що дозволяють досягти максимальної несучої здатності матеріалу, уникаючи його пошкодження та забезпечуючи довготривалу стабільність виробів. Таким чином, дана робота закладає фундаментальну мікромеханічну основу для розробки передових технологій ущільнення.*

**Ключові слова:** ущільнення, метод дискретних елементів, дисперсні матеріали, композити, частота вібрації.

### **Вступ**

Ущільнення дисперсних матеріалів є фундаментальним технологічним процесом, що безпосередньо визначає несучу здатність, стійкість до деформацій та загальну довготривалу стабільність експлуатації кінцевого виробу. Сутність цього процесу полягає у перегрупуванні та перерозподілі окремих частинок під дією зовнішніх сил, що призводить до зменшення пористості та формування щільної, стійкої структури. Традиційні підходи до моделювання цього явища, що базуються на макроскопічних методах, таких як метод скінченних елементів, розглядають матеріал як суцільне середовище. Хоча такі моделі ефективні для аналізу загального напружено-деформованого стану конструкції, вони мають суттєві обмеження у поясненні фундаментальних мікромеханічних явищ, що лежать в основі ущільнення. Зокрема, вони не дозволяють детально проаналізувати рух, обертання та взаємодію окремих частинок, що є ключовими для розуміння механізмів формування внутрішньої структури та виникнення деградаційних процесів, таких як переущільнення.

Аналітичний огляд сучасної наукової літератури свідчить про зростаючий інтерес до мікромеханічних методів дослідження. Ранні макроскопічні моделі, представлені в роботах [1-4], хоча й дозволяли симулювати деформацію дисперсних сумішей, базувалися на феноменологічних законах і не могли врахувати вплив індивідуальних характеристик частинок (розміру, форми, гранулометрії) на процес ущільнення. З розвитком обчислювальних технологій провідним інструментом для мікромеханічного аналізу став метод дискретних елементів (DEM), який моделює систему як сукупність окремих взаємодіючих частинок. Дослідження [5-7] підтвердили, що DEM є потужним інструментом для аналізу ущільнення та структурних характеристик дисперсних матеріалів, підкресливши важливість врахування обертання частинок для коректного моделювання зміни пористості. В роботах [8-10] автори продемонстрували ефективність DEM для моделювання випробувань на прямий зсув дисперсного матеріалу, відтворюючи реальні траєкторії напружень. Застосування DEM для аналізу вібраційного ущільнення було детально розглянуто в працях [11-13],

де було проведено моделювання системи ущільнення вальцями для аналізу еволюції пористості та механічної реакції на мікрорівні. Водночас, експериментальні дослідження виявили існування критичної точки, за якою подальше ущільнення стає контрпродуктивним. В роботі [14, 15] ввели поняття "критичної щільності", перевищення якої призводить до руйнування внутрішньої структури та зниження міцності матеріалу. Лабораторні випробування, зокрема в роботі [16], кількісно оцінили вплив тиску обтиснення, гранулометрії та ступеня ущільнення на перманентну деформацію матеріалу під дією циклічних навантажень. Незважаючи на значний обсяг проведених досліджень, залишається недостатньо вивченим зв'язок між динамікою окремих частинок (їх переорієнтацією, механізмами дисипації енергії) та макроскопічними показниками якості ущільнення (динамічною жорсткістю, деформацією). Зокрема, бракує узагальненого розуміння фізичних процесів, що визначають точку оптимального ущільнення та механізми деградації матеріалу при переущільненні.

Таким чином, метою даної статті є систематичний аналіз мікромеханічних процесів, що відбуваються при ущільненні дисперсних матеріалів різними методами (вібраційним, обертальним, циклічним), на основі синтезу результатів сучасних DEM-моделювань та лабораторних досліджень. Для досягнення цієї мети поставлено наступні завдання: 1) описати еволюцію напружень, просторового розташування частинок та шляхів дисипації енергії протягом усього процесу ущільнення; 2) визначити об'єктивні критерії досягнення оптимального стану ущільнення та розкрити мікромеханічні механізми деградації матеріалу при переущільненні; 3) проаналізувати вплив ключових технологічних параметрів (частоти, тиску, кількості проходів) та властивостей матеріалу (гранулометрії) на формування кінцевої структури та механічних властивостей ущільненого шару.

### Матеріали та методи

Для глибокого розкриття мікромеханізмів, що керують процесом ущільнення дисперсних матеріалів у проаналізованих дослідженнях використовувався комплексний підхід. Він поєднує потужні можливості чисельного моделювання методом дискретних елементів (DEM) для аналізу на рівні окремих частинок та верифікаційні лабораторні експерименти, що дозволяють підтвердити адекватність чисельних моделей та вивчити макроскопічні прояви цих мікромеханізмів.

Чисельне моделювання проводилося з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє відстежувати рух та взаємодію великої кількості окремих частинок.

Для створення реалістичних моделей частинок неправильної форми застосовувалися передові методи. Зокрема, "метод заповнення дисками" дозволяв генерувати двовимірні частинки складної геометрії на основі їх контурів, а «комполітна модель», що передбачає жорстке з'єднання двох або більше сфер, використовувалася для імітації асферичності у тривимірному просторі. Гранулометричний склад зразків задавався відповідно до експериментальних кривих розподілу або на основі фрактальної моделі, що дозволяє кількісно описати розподіл частинок за розмірами за допомогою одного параметра – фрактального розміру.

Для опису механічної взаємодії між частинками, а також між частинками та стінками моделі, використовувалися різні контактні закони. Найбільш поширеними були лінійна контактна модель з опором коченню, яка враховує не тільки тертя ковзання, але й момент, що перешкоджає обертанню, та модель контакту Герца-Міндліна, що описує нелінійну пружну взаємодію при зіткненні.

Ключовим етапом моделювання було калібрування мікромеханічних параметрів контактних моделей (нормальної та тангенціальної жорсткості, коефіцієнтів тертя ковзання та кочення). Цей процес полягав у зіставленні результатів чисельного моделювання стандартних лабораторних випробувань, найчастіше трьохосних випробувань на стиск, з реальними експериментальними даними. Параметри вважалися відкаліброваними, коли змодельована крива "напруження-деформація" збігалася з експериментальною.

Лабораторні випробування виконували дві ключові функції: отримання даних для калібрування DEM-моделей та незалежне вивчення макроскопічних явищ ущільнення. У дослідженнях використовувалося високотехнологічне обладнання, зокрема: великомасштабний динамічний та статичний трьохосовий апарат для проведення циклічних випробувань на зразках великого розміру, що дозволяє вивчати перманентну деформацію матеріалів; спеціально розроблені апарати для вібраційного ущільнення, оснащені датчиками для неперервного вимірювання щільності та динамічної жорсткості в реальному часі; рентгенівська комп'ютерна томографія, яка застосовувалася для неруйнівної візуалізації внутрішньої структури зразка на різних етапах ущільнення, що дозволило безпосередньо спостерігати за еволюцією розташування та орієнтації частинок.

Типова схема моделювання вібраційного ущільнення включала створення моделі шару дисперсного матеріалу, віброуючого котка та системи моніторингу. Для відстеження локальних

напружень усередині зразка використовувалися віртуальні вимірювальні кола, які усереднювали контактні сили між частинками в межах своєї площі та дозволяли розраховувати компоненти тензора напружень (горизонтальні, вертикальні, зсувні). У ході аналізу відстежувалася еволюція широкого спектра ключових вихідних параметрів, що характеризують стан системи як на макро- (коефіцієнт пористості, перманентна деформація ( $\epsilon$ ), динамічна жорсткість), так і на мікрорівні (тензор напружень, орієнтація частинок, зокрема кут нахилу довгої осі до горизонту, компоненти дисипації енергії, у вигляді енергії, що розсіюється через ковзання, кочення та демпфування). Застосування такого комплексного підходу дозволило отримати деталізовані дані, які лягли в основу аналізу.

### Результати та обговорення

Комплексний аналіз процесу ущільнення дисперсних матеріалів поєднує макроскопічні спостереження, отримані в ході лабораторних випробувань, з мікромеханічними поясненнями, що стали можливими завдяки застосуванню методу дискретних елементів. Синтез цих підходів дозволяє сформулювати цілісне уявлення про еволюцію структури матеріалу та її вплив на механічні властивості.

Процес ущільнення дисперсних матеріалів під дією зовнішніх навантажень (циклічних, вібраційних) є нелінійним і розвивається в кілька етапів. На початковій стадії спостерігається швидке зменшення пористості та інтенсивне накопичення перманентної деформації. Це пов'язано з інтенсивним перегрупуванням частинок та заповненням великих пор. На наступній стадії швидкість ущільнення значно сповільнюється, оскільки більшість легких переміщень вже відбулася, і процес зводиться до локальних обертань та зсувів частинок для досягнення більш щільної упаковки. Нарешті, система досягає стабільного стану, коли подальші деформації практично припиняються, що свідчить про формування стійкого силового каркаса. Цю динаміку можна чітко прослідкувати на прикладі перманентної деформації ( $\epsilon$ ) під час циклічних випробувань.

Аналіз напружень під час вібраційного ущільнення показує, що вертикальні напруження очікувано зменшуються з глибиною. Водночас розподіл горизонтальних напружень має складніший характер: ущільнений верхній шар під дією вертикального навантаження прагне до розширення в боки, що створює стискаючі напруження у верхній та нижній частинах шару і менші – у середній. Такий розподіл нагадує картину напружень при випробуваннях на розколювання, що свідчить про роботу ущільненого шару як єдиного цілого. На мікрорівні аналіз руху частинок показав, що ключову роль в ущільненні відіграє не стільки їхнє прямолінійне переміщення, скільки обертання, яке дозволяє частинкам знаходити більш стабільні та компактні положення.

На рис. 1-3 представлені залежності компонент тензора напружень від накопиченої пластичної деформації в діапазоні  $\epsilon_u = 0 \dots 0.6$ .  $\sigma_{zz}$  зростає швидко при малих  $\epsilon_u$  і потім наближається до насичення (форму задає експоненціальна частина). Це відображає перехід від контактних точок до широких площ контактів.  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  початково значно менші, але у м'яких матрицях (Al) швидше вирівнюються — це певно через більшу ізотропність.  $\tau_{xz}$  має пікову поведінку — зростає, коли починаються інтенсивні мікрозсуви і перебудова контактної мережі; після утворення стійких контактів вона стабілізується або трохи знижується. У випадку жорстких наповнювачів амплітуда піку більша.

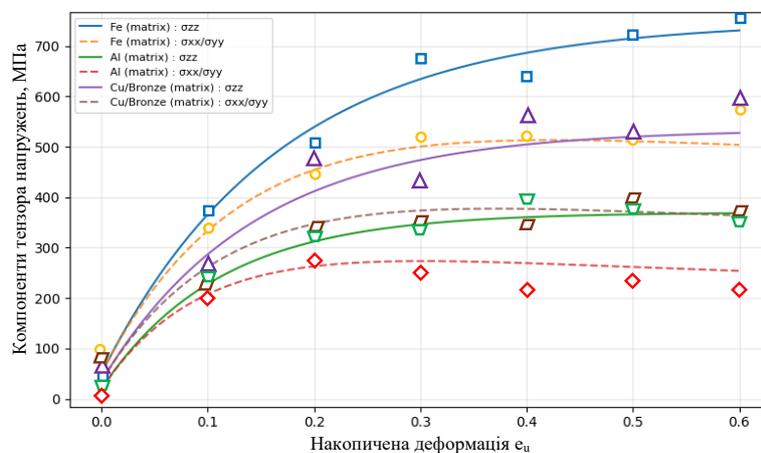


Рис. 1. Залежності компонент тензора напружень від накопиченої пластичної деформації при ущільненні дисперсних композитних матеріалів отримані експериментально і моделюванням методом скінчених елементів

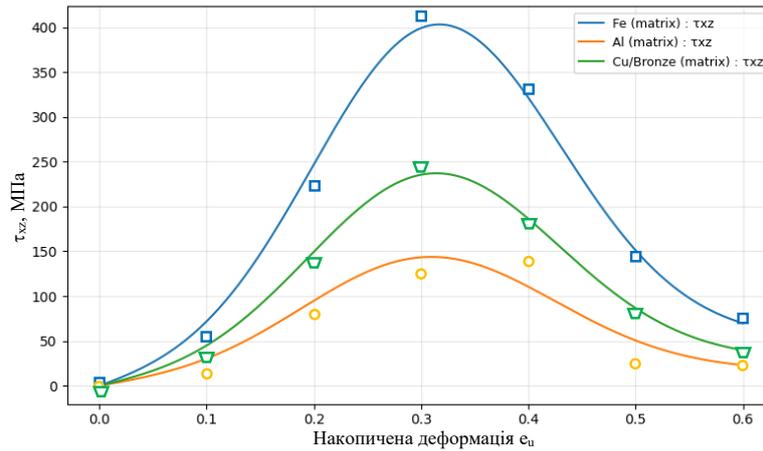


Рис. 2. Залежності напружень  $\tau_{xz}$  від накопиченої пластичної деформації при ущільненні дисперсних композитних матеріалів отримані експериментально і моделюванням методом скінчених елементів

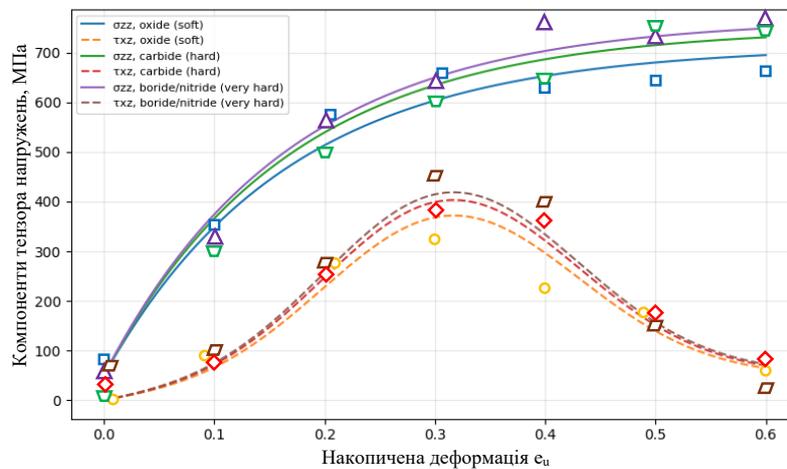


Рис. 3. Вплив наповнювача на залежності компонент тензора напружень  $\tau_{xz}$  від накопиченої пластичної деформації при ущільненні дисперсних композитних матеріалів отримані експериментально і моделюванням методом скінчених елементів

Традиційний підхід, що пов'язує якість ущільнення лише зі щільністю, є неповним, оскільки не враховує механічні властивості. Сучасні дослідження вводять більш інформативні показники. Ключовим поняттям є точка блокування ущільнення, яка визначається як момент досягнення піку динамічної жорсткості матеріалу. Цей макроскопічний показник, який можна виміряти в процесі ущільнення, має чітку мікροструктурну основу: він відповідає моменту, коли приблизно 60% великих частинок досягають стабільної горизонтальної орієнтації, формуючи міцний несучий каркас.

Досягнення точки блокування ущільнення означає, що матеріал набув максимальної несучої здатності. Продовження ущільнення після точки блокування ущільнення призводить до негативних наслідків — переущільнення. На цьому етапі додаткова енергія вібрації не покращує структуру, а навпаки, руйнує її. Основний механізм деградації полягає в поверхневому шліфуванні (стиранні) великих частинок, що контактують між собою. Це руйнує точки контакту у сформованому каркасі, призводить до мікроруйнувань та, як наслідок, до зниження динамічної жорсткості та інших механічних показників. Таким чином, переущільнення є деструктивним процесом, якого слід уникати. Ці спостереження дозволяють по-новому поглянути на класичні теорії вібраційного ущільнення. Теорія повторних навантажень та теорія знакозмінної зсувної деформації найкраще пояснюють спостережувані явища, оскільки саме циклічний зсув є причиною перегрупування частинок. Натомість теорія резонансу виявляється менш придатною, оскільки власна частота коливань системи постійно змінюється в міру її ущільнення, що робить досягнення сталого резонансу неможливим.

На рис. 4 відображені криві інтенсивності девіатора напружень для порошоків - Fe, бронзи/Cu, Ni, Al; композитів - Fe + карбіди, Fe + нітриди, Al + оксиди, Ni + бориди. Форма кривих демонструє: початково високе значення інтенсивності девіатора напружень через попередню історію

навантаження; різке зростання девіатора із зменшенням пористості під час ущільнення; пік девіатора характерний для переущільнених порошків, коли структура чинить максимальний опір деформації; невелике зниження після піку через перебудову контактів частинок.

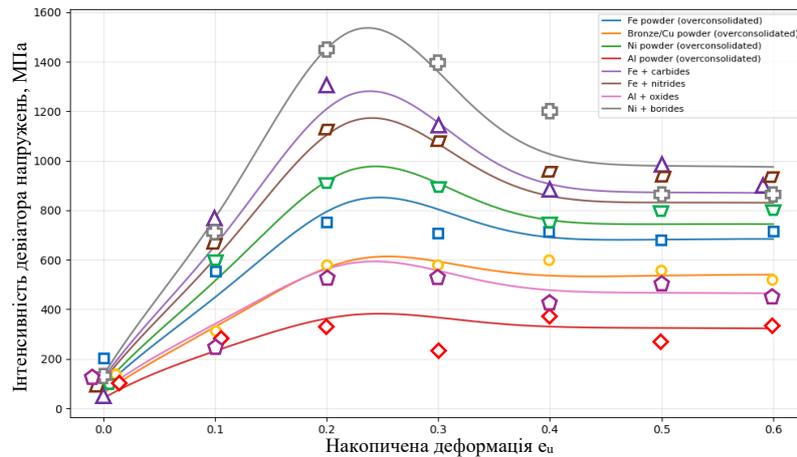


Рис. 4. Залежності інтенсивності девіатора напружень від накопиченої пластичної деформації при переущільненні дисперсних композитних матеріалів отримані експериментально і моделюванням методом скінчених елементів

Досягнення оптимального стану ущільнення, уникаючи при цьому переущільнення, вимагає ретельного налаштування технологічних параметрів та врахування властивостей самого матеріалу.

Тиск обтиснення імітує бічний тиск матеріалу або тиск від вищерозташованих шарів, має значний вплив на перманентну деформацію при низьких значеннях. Однак при високих значеннях тиску його вплив зменшується, оскільки матеріал вже знаходиться у щільно затиснутому стані.

На рис. 5 представлені залежності тиску обтиснення від деформації для чистих металевих порошків (Fe, Cu, Ni, Al), які демонструють плавний експоненціальний ріст тиску; Ni та Fe показують найбільшу жорсткість; Al — найм'якший, тиск росте повільніше. Для композитів з твердими наповнювачами характерно: суттєве збільшення тиску обтиснення; карбіди та бориди демонструють найбільше підвищення жорсткості; нітриди та оксиди — проміжний ефект; крива піднімається значно вище за металеві порошки.

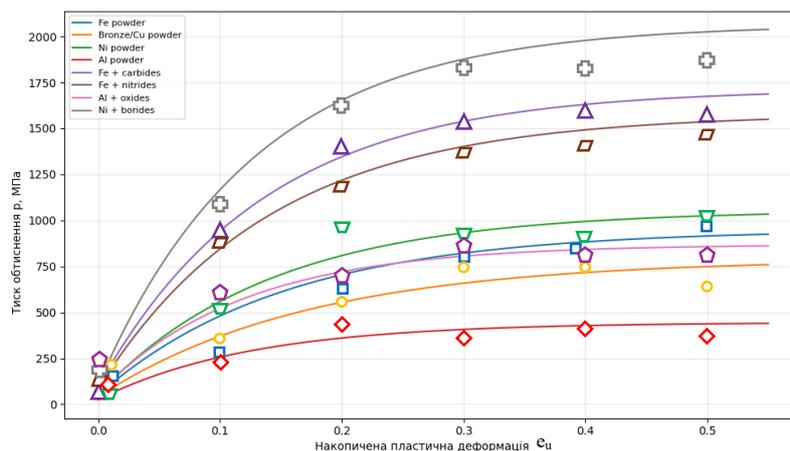


Рис. 5. Залежності тиску обтиснення від деформації при ущільненні дисперсних порошків і композитів отримані експериментально і моделюванням методом скінчених елементів

Склад матеріалу є одним з ключових факторів. Існує оптимальний гранулометричний склад (оптимальне співвідношення великих та дрібних фракцій), при якому досягається найщільніша упаковка, що мінімізує перманентну деформацію. Відхилення в будь-який бік погіршує результат.

На рис. 6 представлений графік найкращого співвідношення фракцій для найщільнішої упаковки порошків, який має вигляд кількох плавних кривих, кожна з яких має чіткий максимум або оптимальне співвідношення дрібної фракції, за якого порошок: ущільнюється найефективніше,

досягає максимальної щільності, демонструє мінімальну перманентну деформацію, має найкращу контактну структуру частинки. Типові оптимальні значення частки дрібної фракції (орієнтовно) за моделлю та експериментальними закономірностями для Fe, Ni порошки  $\approx 0.35-0.45$ ; бронза / Cu  $\approx 0.30-0.40$ ; Al порошок  $\approx 0.25-0.35$ . Для композитів - Fe + карбіди / нітриди  $\approx 0.45-0.55$ ; Al + оксиди  $\approx 0.40-0.50$ ; Ni + бориди  $\approx 0.50-0.60$  (найбільша оптимальна частка дрібних).

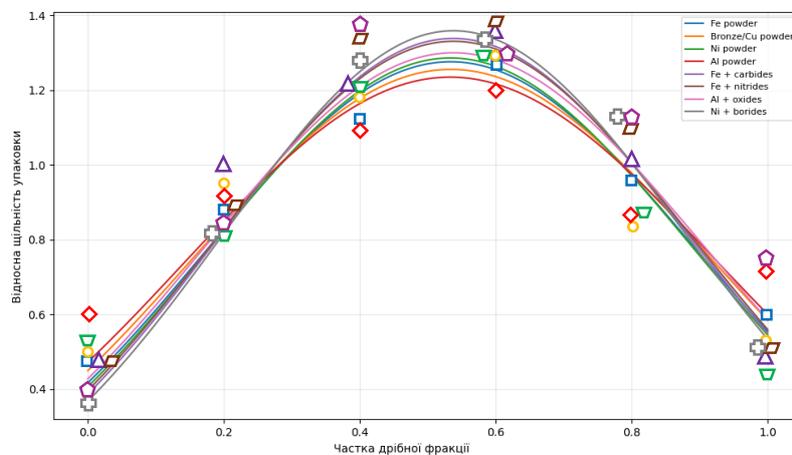


Рис. 6. Найкраще співвідношення фракцій для найщільнішого упакування порошків і композитів отримані експериментально і моделюванням методом скінчених елементів

Теоретична відносна щільність упакування ґрунтується на геометричних моделях упакування частинок, їхньому гранулометричному складі та способі заповнення простору. Теоретична відносна щільність:

$$\rho = \frac{\rho_{\text{факт}}}{\rho_{\text{теор}}} \quad (1)$$

де  $\rho_{\text{факт}}$  — фактична (реальна) щільність компакта після ущільнення;  $\rho_{\text{теор}}$  — теоретично можлива максимальна щільність матеріалу (безпористий стан).

Для композитів теоретична щільність часто визначається:

$$\rho_{\text{теор}} = \sum V_i \rho_i \quad (2)$$

де  $V_i$  — об'ємна частка компонента;  $\rho_i$  — щільність кожної фази.

Експериментально відносну щільність визначають шляхом безпосереднього вимірювання маси, об'єму та пористості ущільненого зразка.

Для кожного типу матеріалу існують оптимальні діапазони частоти вібрації та кількості проходів. Наприклад, для асфальтобетонних сумішей оптимальна частота знаходиться в діапазоні 18–22 Гц, а оптимальна кількість проходів – 4–5 [2]. Вихід за межі цих діапазонів призводить до зниження ефективності ущільнення або до переущільнення.

Існування цих оптимумів можна пояснити з точки зору механізмів дисипації енергії. Енергія, що передається матеріалу, розсіюється кількома шляхами: через демпфування, тертя ковзання та ковзання при коченні. Аналіз DEM-моделей показав, що саме енергія ковзання при коченні є найефективнішою для ущільнення, оскільки вона безпосередньо пов'язана з корисним перегрупуванням частинок [14]. Оптимальні технологічні параметри відповідають умовам, за яких максимізується саме цей вид дисипації енергії.

На основі великих масивів даних, отриманих з DEM-моделювання та лабораторних випробувань, розробляються математичні моделі, що дозволяють прогнозувати поведінку матеріалу. Сучасні дослідження пропонують уніфіковані моделі для опису накопичення перманентної деформації. Наприклад, модель виду [16]

$$\varepsilon = \frac{p \cdot N}{q + N} \quad (3)$$

де  $N$  – кількість циклів;  $p$  та  $q$  – параметри моделі.

показала значно кращу відповідність експериментальним даним порівняно з степеневими чи логарифмічними моделями. Такі моделі є потужним інструментом для інженерів, дозволяючи прогнозувати довготривалу поведінку матеріалу та оптимізувати параметри ущільнення ще на етапі проектування.

Представлений комплексний аналіз мікро- та макропараметрів дозволяє сформулювати цілісне уявлення про процес ущільнення, його ключові етапи та механізми, що відкриває шлях до розробки науково обґрунтованих технологій контролю якості.

### Висновки

Мета даної статті, що полягала в систематичному аналізі мікромеханізмів ущільнення гранульованих матеріалів, була досягнута шляхом синтезу результатів сучасних чисельних та експериментальних досліджень. Проведений аналіз дозволяє зробити наступні ключові висновки:

1. Ущільнення гранульованих матеріалів є багатостадійним процесом, керованим перегрупуванням частинок, яке призводить до формування щільної та стабільної структури. Метод дискретних елементів (DEM) є ефективним інструментом для детального моделювання та розуміння цієї динаміки на мікрорівні.

2. Існує оптимальний стан ущільнення, визначений як точка блокування ущільнення. Цей стан характеризується досягненням піку механічної жорсткості матеріалу та відповідає формуванню стійкого каркаса, в якому близько 60% великих частинок орієнтовані переважно горизонтально.

3. Переущільнення, тобто продовження процесу після досягнення точки блокування ущільнення, є деструктивним явищем. Воно не покращує, а погіршує властивості матеріалу, призводячи до стирання поверхні частинок, руйнування силового каркаса та, як наслідок, зниження механічних характеристик.

4. Технологічні параметри (частота вібрації, тиск, кількість проходів) та властивості матеріалу (гранулометричний склад) можуть і повинні бути оптимізовані для кожного конкретного випадку, щоб досягти стану точки блокування ущільнення з максимальною ефективністю та без ризику пошкодження матеріалу.

5. Аналіз енергетичного балансу показав, що ковзання при коченні є домінуючим механізмом корисної дисипації енергії, який безпосередньо сприяє ущільненню. Оптимізація процесу полягає у максимізації саме цього виду енергетичних витрат.

Слід зазначити, що дане дослідження є синтезом існуючих наукових праць, які переважно базуються на чисельному моделюванні та лабораторних випробуваннях. Ці підходи, хоч і є потужними, можуть не повністю відображати складні умови, такі як неоднорідність матеріалу, вплив вологості та температури та особливості роботи обладнання.

Перспективними напрямками подальших досліджень є проведення масштабних інструментальних випробувань для валідації результатів DEM-моделювання та розробка систем моніторингу процесу ущільнення в реальному часі. Такі системи, засновані на вимірюванні динамічної жорсткості, дозволять контролювати досягнення точки блокування ущільнення і запобігати переущільненню, що значно підвищить якість та довговічність виробів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Guler, M., Masad, E. A., & Rajagopal, K. R. (2004). Constitutive modeling of asphalt concrete in the linear viscoelastic range. *Int. J. Pavement Eng.*, 5(4), 215–224. DOI <https://doi.org/10.1080/10298430412331333857>
- Jiao, R., Nguyen, V., & Zhang, J. (2021). Analyzing the compacting energy and force distribution during the tamper-asphalt mixture interaction. *Journal of Vibroengineering*, 23(5), 1148–1158. <https://doi.org/10.21595/jve.2021.21937>
- Knight, J. B., Fandrich, C. G., Lau, C. N., Jaeger, H. M., & Nagel, S. R. (1995). Density relaxation in a vibrated granular material. *Phys. Rev. E*, 51(5), 3957. DOI <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.3957>
- Koneru, S., Masad, E., & Rajagopal, K. (2008). A thermomechanical framework for modeling the compaction of asphalt mixes. *Mech. Mater.*, 40(10), 846–864. DOI <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2008.03.008>
- Ma, K., Liu, R., Wu, F., & Xu, J. (2022). Statistical analysis of wave localization and delocalization in one-dimensional randomly disordered phononic crystals with finite cells. *Waves Random Complex Medium*, 1–30. DOI <https://doi.org/10.1080/17455030.2022.2025502>
- Ma, K., Wang, L., Long, L., Peng, Y., & He, G. (2020). Discrete element analysis of structural characteristics of stepped reinforced soil retaining wall. *Geomatics Nat. Hazards Risk*, 11(1), 1447–1465. DOI <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1797907>
- Ma, Z., Dang, F., & Liao, H. (2014). Numerical study of the dynamic compaction of gravel soil ground using the discrete element method. *Granular Matter*, 16, 881–889. DOI <https://doi.org/10.1007/s10035-014-0529-x>
- Man, T., Le, J.-L., Marasteanu, M., & Hill, K.M. (2022). Two-Scale Discrete Element Modeling of Gyrotory Compaction of Hot Asphalt. *Journal of Engineering Mechanics*, 148(2), 04021140 DOI . [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0002035](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002035)

9. Salazar, J., Asadi, M. S., & Mercado, V. (2018). Three-dimensional discrete element simulation of direct shear test of sand with realistic particle shape. *Computers and Geotechnics*, 102, 35–45. DOI <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.05.011>.
10. Sivak, R., Kulykivskiy, V., Savchenko, V., Minenko, S., & Borovskiy V. (2023). Determination of porosity functions in the pressure treatment of iron-based powder materials in agricultural engineering. *Scientific Horizons*, 26(3), 124-134. DOI: <https://doi.org/10.48077/scihor3.2023.124>.
11. Stępień, Justyna & Chomicz-Kowalska, Anna & Tutaj-Dudała, Magdalena & Dudała, Michał & Maciejewski, Krzysztof & Ramiączek, Piotr & Iwański, Mateusz. (2025). Influence of Compaction Methods on Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement Wearing Surfaces. *Materials*. 18. 492. 10.3390/ma18030492.
12. Zhang, Xing & Luo, Ting & Song, Er Bo & Geng, Yi. (2020). Algorithm for optimal path planning of impact roller in high-embankment airport. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 8. 159-163. 10.3208/jgssp.v08.c06.
13. Novak, M. & Han, Yingcai. (1990). Impedances of Soil Layer with Boundary Zone. *Journal of Geotechnical Engineering*. 116. 1008-1014. 10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:6(1008)..
14. Wang, W., Hu, W., & Liu, S. (2023). An Investigation of Particle Motion and Energy Dissipation Mechanisms in Soil–Rock Mixtures with Varying Mixing Degrees under Vibratory Compaction. *Appl. Sci.*, 13, 11359 .DOI <https://doi.org/10.3390/app132011359>
15. Xie, K., Chen, X., Yao, J., et al. (2024). Vibration compaction mechanism of high-speed railway fillers based on dynamic evolution of coarse particles. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 46(4), 803-813.
16. Zhang, Z.-T., Gao, W.-H., Wang, Y.-H., Hu, W., & Liu, S.-K. (2023). Permanent Deformation and Its Unified Model of Coal Gangue Subgrade Filler under Traffic Cyclic Loading. *Appl. Sci.*, 13, 4128/ DOI <https://doi.org/10.3390/app13074128>.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування

Стаття надійшла до редакції 14.09.2025 р.

**Сивак Роман Іванович** - доктор технічних наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, <https://orcid.org/0000-0002-7459-2585>, e-mail: [sivak\\_r\\_i@ukr.net](mailto:sivak_r_i@ukr.net).

**Наляжний Володимир Сергійович** – аспірант, <https://orcid.org/0009-0009-6185-3051>, e-mail: [vova.naliazhnyi@gmail.com](mailto:vova.naliazhnyi@gmail.com).

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**R. Sivak<sup>1</sup>**  
**V. Naliazhnyi<sup>1</sup>**

## **Micromechanical aspects and ways to increase the efficiency of the compounding process of dispersed materials**

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*High-quality compaction of dispersed materials is a critically important stage for ensuring the durability and operational reliability of the final product. The purpose of this study is to synthesize and analyze modern scientific works devoted to micromechanical compaction mechanisms, based on the discrete element method (DEM) and confirmed by laboratory tests, to determine the key parameters for optimizing the process. The results show that compaction is a process of particle rearrangement and redistribution, which leads to the filling of pores and the formation of a stable force framework. The concept of "compaction blocking point" is considered, which corresponds to the moment of reaching the peak of dynamic stiffness of the material. At the micro level, this state is characterized by the achievement of a stable horizontal orientation of about 60% of large particles, which indicates the formation of a stable skeleton. The negative consequences of overcompaction, which occurs after reaching the peak of dynamic stiffness of the material, are investigated. Further impact leads not to improvement, but to degradation of the material due to grinding of the surface of large particles and destruction of the formed framework, which leads to a decrease in mechanical properties. The influence of key parameters, such as vibration frequency, compression pressure and particle size distribution, on the stress state and permanent deformation was analyzed. It was found that optimization of these parameters allows to maximize the useful compaction energy, in particular the sliding energy during rolling, which is the most effective for dissipation. The practical value of the study is to create a scientific basis for the development of optimized compaction technologies that allow to achieve the maximum bearing capacity of the material, avoiding its damage and ensuring long-term stability of the products. Thus, this work lays a fundamental micromechanical foundation for the development of advanced sealing technologies.*

**Keywords:** compaction, discrete element method, dispersed materials, composites, vibration frequency

**Sivak Roman** – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering, <https://orcid.org/0000-0002-7459-2585>, e-mail: [sivak\\_r\\_i@ukr.net](mailto:sivak_r_i@ukr.net).

**Naliazhnyi Volodymyr** – Ph. D. Student, <https://orcid.org/0009-0009-6185-3051>, e-mail: [vova.naliazhnyi@gmail.com](mailto:vova.naliazhnyi@gmail.com).