### 6УДК 004.42:539.3

#### DOI: 10.20998/2078-9130.2024.2.316499

# С. В. БОНДАРЬ, О. А. БАТЮК, Д. В. БРЕСЛАВСЬКИЙ

# МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ УДАРНОГО РУЙНУВАННЯ ПЛАСТИН З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ PERIDIGM

У статті розглянуто підхід до чисельного моделювання ударного непружного навантаження твердих тіл. Обговорюється використання різних чисельних підходів до опису ударного деформування твердих деформованих тіл, порівнюються застосування методу скінченних елементів та методів перидинамічного аналізу. До проведення моделювання застовано основні теоретичні положення перидинаміки. Для розрахункового оцінювання процесів ударної взаємодії та руйнування застосовано програмний комплекс Peridigm. Розглянуто основні співідношення методу розрахунку. Для аналізу процесів руйнування використано модель матеріалу, основану на описі в'язів. Обговорюється реалізація розгортання обчислювальних проєктів з застосуванням контейнерів Docker. Аналізується програмна реалізація проєкту за допомогою модулів програмного комплексу Peridigm, розглянуто діаграми класів, послідовності, компонентів та активності, що призначені для опису властивостей проєктів. Обговорюється технічні можливості виконання чисельного аналізу різних механічних процесів з використанням різних, в тому числі комплексу Peridigm, розглянуто діаграми класів, послідовності, компонентів та активності, що призначені для опису властивостей проєктів. Обговорюються технічні можливості виконання чисельного аналізу різних механічних процесів з використанням різних, в тому числі користувацьких, програмних модулів для завдання визначальних рівнянь, обчислювальних процедур, введення-виведення та управління даними. Проаналізовано послідовність проведення розрахунків з використанням розробленого обчислювального проєкту. На прикладі задачі ударного пробиття сталевої пластини сферичним ударником, що рухається з різними швидкостями, продемонстровано можливості чисельного прокати з рикладі задачі ударного пробиття сталевої пластини мавнатаження. Встановлено діапазони швидкості, при яких виникають незворотні пластичні деформації, починається руйнування, реалізується часткове або повне пробиття сталевоті никають навитаження. Встановлено діапазони швидкості, при яких виникають незворотні пл

Ключові слова: чисельне моделювання, перидинаміка, удар, руйнування, програмний комплекс Peridigm, пластина .

### S. BONDAR, O. BATIUK, D. BRESLAVSKY

## MODELLING OF IMPACT FRACTURE PROCESSES OF PLATES USING PERIDIGM SOFTWARE

The paper considers an approach to numerical modeling of impact inelastic loading of solids. The use of various numerical approaches to describing impact deformation of solid deformed bodies is discussed, the application of the finite element method and methods of peridynamics analysis are compared. The basic theoretical concepts of peridynamics are used for modeling. The Peridigm software is used for computational evaluation of impact interaction and fracture processes. The main relations of the calculation method are considered. A bond-based material model is used in calculations to analyze fracture processes. The implementation of the deployment of computational projects using Docker containers is discussed. The software implementation of the project is analyzed using the modules of the Peridigm software, and class, sequence, component, and activity diagrams intended to describe the properties of projects are considered. The technical possibilities of periodynamics including user-defined, software modules for setting constitutive equations, computational procedures, input-output and data management are discussed. The sequence of calculations using the developed computational project is analyzed. Using the example of the problem of impact penetration of a steel plate by a spherical impactor moving at different velocities, the possibilities of numerical analysis of deformation and fracture of structural elements with determination of the shapes of the resulting macroscopic defects are demonstrated. For the given example, various velocity loading modes are analyzed. The velocity ranges at which irreversible plastic deformation occur, fracture begins, and partial or complete plate penetration is realized are established.

Key words: numerical modeling, peridynamics, impact, fracture, Peridigm software package, plate

Вступ. Задачі ударного деформування та пов'язаного з ним руйнування елементів конструкцій є одними з найбільш складних у механіці деформівного твердого тіла. Завдяки поєднанню у них динамічних процесів та процесів незворотного деформування їхній математичний опис завжди викликає труднощі [1; 2]. До того ж розв'язання майже усіх практичних задач, характеризуються складною геометрією шо конструктивних елементів та граничних умов, потребує використання наближених або чисельних методів. Одним з останніх, що найбільш широко використовується наразі при аналізі ударного навантаження конструкцій, є метод скінченних елементів (МСЕ) [3]. Серед реалізацій останнього найбільш поширеним є програмний комплекс LS Dyna [4]. Він дозволяє проводити комп'ютерне моделювання процесів ударного деформування, проникнення та подальшого руйнування.

Використання скінченноелементних підходів та програмних комплексів на жаль, не завжди надає можливість адекватного опису процесу руйнування – виникнення та розвитку тріщин, фрагментації зруйнованих частин конструктивного елементу тощо [5].

В останні десятиліття виник новий напрям у механіці руйнування. Він отримав назву перидинаміки [6; 7]. В основу перидинамічних підходів покладено безсіточну теорію, запропоновану Сіллінгом та Аскарі [7]. У перидинаміці замість класичних рівнянь рівноваги використовуються інтегральні рівняння, що дозволяє моделювати процеси виникнення розривів у матеріалі і руйнування без явного завдання граничних умов на тріщинах.

Одними з найрозповсюдженіших конструктивних елементів є тонкі пластини. Завдяки їхній малій вазі та достатній жорсткості вони отримали широке розповсюдження у машинобудуванні. Однак завдяки малій товщині дія ударних динамічних впливів може призводити до їхнього виходу з ладу завдяки істотному або руйнуванню. Перидинамічні деформуванню підходи останнім часом дуже ефективно використовуються при аналізі процесів руйнування пластин [6; 8-10]. Авторами [8] змодельовано прогресуючий процес руйнування тонкої пластини під дією деформації з використанням підходів класичної механіки та перидинаміки. Робота [9] спрямована на

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. № 2. 2024

чисельне перидинамічне моделювання динамічного процесу руйнування скляних пластин, що піддаються високошвидкісним ударним навантаженням. Враховуються кілька параметрів: швидкість удару, кут удару, площа контакту при ударі, товщина пластини та відсоток пористості матеріалу. Досліджено вплив цих параметрів на пошкодження пластини, виникаючі сили та коефіцієнт vларної взаємолії відновлення. Побудовано функціональну залежність між відсотком пошкодження пластини, швидкістю кулі та товщиною У дослідженні, представленому пластини. роботі [10], зв'язані рівняння механічної дифузії розв'язуються за допомогою введеної концепції перидинамічного диференціального оператора, яка використовується для перетворення рівняння в часткових похідних у перидинамічну форму рівняння. Ефективність запропонованого підходу демонструється на прикладі тонкої електродної пластини з кількома вже існуючими тріщинами, орієнтованими в різних напрямках.

Особливості використання перидинамічних алгоритмів роблять їх схожими з алгоритмами МСЕ. У зв'язку з цим одним з ефективних напрямів моделювання виявилось використання вже досить повно розробленого скінченноелментного програмного забезпечення побудови лля розрахункових перидинамічних схем [11-13]. Такий же підхід обрано в даній роботі для побудови засобів комп'ютерного моделювання руйнування пластин з використанням перидинамічних моделей.

Постановка задачі та метод розв'язку. Для математичного опису процесу деформування та руйнування застосуємо метод Сіллінга та Аскарі [6; 7], згідно якому рівняння руху динамічно навантаженого тіла:

$$\rho(x)\ddot{u}(x,t) = \int_{V} \left( F(x,t)\langle q-x\rangle - F(q,t)\langle x-q\rangle \right) dV + F_{v}(x,t)$$
(1)

піддано прямій дискретизації. Тут  $x(x_i), q(x_i), i=1.2,3$ матеріальні точки у тривимірному просторі, u(x,t) – вектор переміщень точок, F() означає перидинамічний силовий стан, dV є нескінчено малий об'єм матеріалу, асоційований з точкою q, F<sub>v</sub> є густиною об'ємних сил. У перидинаміці тіло представляється набором частинок, які взаємодіють між собою у вигляді в'язів. Вплив частинок одна на одну відбувається на кінцевій замкнутого об'єму, відстані всередині як y молекулярній динаміці [6; 7]. Згадана дискретизація призводить до отримання наступного опису динаміки тіла:

$$\rho(x)\ddot{u}(x,t) = \sum_{V} \left( F(x,t) \langle q - x \rangle - F(q,t) \langle x - q \rangle \right) \Delta V + F_{v}(x,t) , \quad (2)$$

тобто інтегральне рівняння (1) замінюється підсумовуванням за певним набором матеріальних точок, що є околом точки x. Силові стани F(x,t) та F(q,t)

виражаються через визначальні закони в точках *x* та *q* відповідно.

У поточному дослідженні застосуємо модель матеріалу, основану на описі в'язів [6]. Матеріальні точки з'єднується в'язами. Обмін силами між точками x та q моделюється завдяки взаємодії, наприклад пружного типу:

1

$$f'(x,q) = f(|y(q) - y(x)|, q, x)M$$
$$M = \frac{y(q) - y(x)}{|y(q) - y(x)|},$$
(3)

де y(x) – деформований стан точки x, M – одиничний вектор, що визначає напрям за деформованим в'язом від точки x до точки q

В'язи можуть пошкоджуватись з часом під дією навантажень. Скалярний параметр пошкоджуваності приписується кожному в'язу. Як й в континуальній механіці пошкоджуваності [14], за умови досягненням параметром пошкоджуваності свого критичного значення в'яз вважається зруйнованим. Критичне значення розтягу в'язу *s*<sub>cr</sub> безпосередньо пов'язано з величиною енергії руйнування, асоційованою з площею поверхні руйнування [6]:

$$s_{cr} = \sqrt{\frac{5U_f}{9\delta K}} \,. \tag{4}$$

де  $U_f$  – величина питомої енергії руйнування , K – об'ємний модуль пружності,  $\delta$  – величина перидинамічного горизонту, тобто відстані, на який враховується взаємодія між точками тіла.

За отриманням певної кількості таких зруйнованих в'язів й виникає тріщина або розподіл елементу тіла на частини.

Засоби комп'ютерного моделювання. Для проведення чисельного моделювання використовуємо програмний комплекс (ПК) з відкритим кодом Peridigm [15]. У зв'язку з нетривіальними питаннями, що виникають при його використанні, особливо при впровадженні нових функцій та повторному налаштуванні середовища виконання, стисло надамо опис структури даного ПК та кроків до його розгортання з використанням контейнерів Docker. Використання Docker допомагає розробникам запускати та перевіряти створювати, ділитися, програми. Ha сьогодні воно ефективним € інструментом у спрощенні процесів розгортання, підвищення ефективності впровадження та досліджень.

Проект перидинамічного аналізу руйнування пластин складається з кількох основних модулів. Ці модулі включають моделювання матеріалів, чисельні процесори, управління даними та граничні умови. Використання Peridigm дозволяє імітувати складні фізичні процеси, включаючи термічні впливи, пластичне деформування та утворення тріщин.

Діаграма класів, що наведено на рис.1, демонструє структуру проекту та взаємодію між

основними класами.

Peridigm є основним класом, який керує процесом моделювання, взаємодіє з моделями матеріалів, процесорними модулями і контролює граничні умови.

Моделі матеріалів (MaterialModel) описують різноманітні типи матеріалів, такі як лінійно-пружні та пластичні.

Алгоритми чисельного розв'язку використовуються у Solver.

Управління даними (DataManager) включає збереження результатів моделювання.

BoundaryConditionManager контролює задані навантаження та граничні умови.

Діаграма класів показує модульну структуру проекту та значення кожної частини. Наприклад, клас Peridigm інтегрує всі основні функції проекту, надаючи управління моделями матеріалів і чисельними процесорами. Використання екземпляру класу моделей матеріалу спрощує додавання нових типів матеріалів. При використані Docker отримується можливість швидкого оновлення коду і компіляції нових моделей, не налаштовуючи окремо своє середовище.

Діаграма послідовності показує, як працює програмний комплекс на різних етапах, починаючи з налаштування матеріалів і закінчуючи зберіганням результатів. Демонструється, як Solver оновлює та перевіряє збіжність даних під час кількох ітерацій. Чітка структура взаємодій дозволяє дослідникам оптимізувати алгоритми для більш швилкого Діаграма показує, як виконується розрахунку. моделювання. Процес включає перевірку збіжності розрахунків і автоматичне налаштування тимчасового кроку для отримання стійкості розв'язку. Вирішуючи, чи досягнуті необхідні критерії точності, Solver виконує ітерації. Це гарантує гнучкість при роботі з моделями зі складними нелінійними властивостями. Використання контейнерів Docker полегшує інтеграцію нових процесорних модулів без пошкодження існуючих функціональних можливостей



Рис. 2 – Діаграма послідовності



Рис. 3 – Діаграма компонентів

Основні модулі системи пов'язані між собою, як показано на діаграмі компонентів (рис.3). Вона демонструє, як різні компоненти, такі, як процесори і модулі введення-виведення даних, взаємодіють один з одним, щоб переконатися, що комплекс працює правильно. Як показано на діаграмі, проект має модульну архітектуру, де кожен компонент виконує певну функцію. Модулі матеріалів налаштовують властивості матеріалів, процесори виконують чисельне моделювання, а модулі управління даними обробляють і аналізують результати. Це дозволяє легко змінювати проект для відповідності з різними задачами, що є важливим для сучасних наукових досліджень.



Рис. 4 – Діаграма активності

Діаграма активності (рис.4) описує всі етапи процесу моделювання, включаючи налаштування, виконання ітерацій, перевірку збіжності, оновлення даних і виведення результатів. Ця діаграма допомагає зрозуміти весь хід моделювання. Розв'язання нелінійних задач і контроль граничних умов є основними процесами, які керуються діаграмою активності. При цьому використання Docker забезпечує стабільність і прискорює обчислення, автоматизуючи всі операції.

Основною перевагою описаного розгортання ПК є можливість створення нових модулів у системі та інтеграції їх в проєкт при збереженні основних функціональних властивостей. Програмні модулі ПК написано мовою С/С++, що дозволяє організувати ефективний процес взаємодії з новими користувацькими підпрограмами [17].

Чисельні результати аналізу ударного руйнування пластини. Як приклад виконаного з використанням розгорнутого проєкту чисельного моделювання наведемо результати аналізу. руйнування сталевої пластини при ударному впливі на неї металевого сферичного ударника (рис.5).

Розглянемо сталеву квадратну пластину зі стороною 180 мм. Товщина пластини 6 мм. Діаметр ударника 30 мм. Розглядаються різні режими ударної взаємодії, що характеризуються різними швидкостями ударника.



Рис. 5 – Схема ударної взаємодії пластини та сферичного ударника

Дані чисельного моделювання представлено на рис. 6-9, на яких послідовно демонструються результати розрахунків з різними значеннями швидкостями ударника: рис 6 (25 м/с); рис 7 (35 м/с); рис 8 (40 м/с); рис 9 (50 м/с).





Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. № 2. 2024



Рис. 9 – Удар зі швидкістю 50 м/с

Аналіз результатів проведеного чисельного моделювання показав, що при швидкості ударника 25 м/с на пластині з'являється вм'ятина без її руйнування. За швидкості 35 м/с починає руйнуватися зовнішня сторона пластини. При швидкості 40 м/с відбувається часткове руйнування пластини на місці контакту. При швидкості 50 м/с має місце повне пробиття пластини.

Висновки. Статтю присвячено викладенню підходу до чисельного моделювання ударного навантаження твердих тіл, яке проводиться з використанням основних теоретичних положень перидинаміки, реалізованих у вигляді алгоритмів програмного комплексу Peridigm. Проаналізовано послідовність проведення розрахунків з використанням розгортання проєктів з застосуванням контейнерів Docker.

На прикладі задачі ударного пробиття пластини продемонстровано можливості чисельного аналізу деформування та руйнування елементів конструкцій з визначенням форм отриманих макроскопічних дефектів. Для заданого прикладу проаналізовано різні швидкісні режими навантаження та встановлено значення швидкості повного пробиття пластини.

#### Список літератури

- Stronge W. J. Impact mechanics. / W. J. Stronge Cambridge university press, 2018. – 53 p. https://doi.org/10.1017/9781139050227
- Walker J. D. Modern impact and penetration mechanics. / J. D. Walker – Cambridge university press, 2021. – 694 p. https://doi.org/10.1017/9781108684026
- Alves M. Impact Engineering: Fundamentals, Experiments, Nonlinear Finite Elements. / M. Alves – CRC Press, 2024. -460 p. https://doi.org/10.1201/9781003485292
- Hallquist J. LS–Dyna theory manual: LSTC (Livermore Software Technology Corporation) / J. Hallquist, – 2018
- Lahe Motlagh P. Comparative study of peridynamics and finite element method for practical modeling of cracks in topology optimization / Lahe Motlagh P., Kefal A. – Symmetry. – 2021. – T. 13. – №. 8. – P. 1407. https://doi.org/10.3390/sym13081407
- Bobaru, F. Handbook of peridynamic modeling, / F. Bobaru, J. T. Foster, P. H. Geubelle, S. A. Silling, – CRC press,2016. – 586 p. https://doi.org/10.1201/9781315373331

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. № 2. 2024

- 7. Silling, S. A.; Askari, E. A meshfree method based on the peridynamic model of solid mechanics. Computers & Structures. 83 (17–18), 2005.
  - C. 1526–1535. <u>https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.11.026</u>
- Guozhe S. Large deformation and fracture analysis of thin plate bending based on peridynamics / Guozhe S. et al. // Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – 2023. – T. 55. – №. 2. – P. 381-389.
- 9. Jafaraghaei Y. Peridynamics simulation of impact failure in glass plates / Y. Jafaraghaei, T. Yu, T. Q. Bui // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2022. – T. 121. – P. 103424. <u>https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103424</u>
- Wang H. Predicting fracture evolution during lithiation process using peridynamics / H. Wang, E. Oterkus, S. Oterkus // Engineering Fracture Mechanics. – 2018. – T. 192. – P. 176-191. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.02.009
- Littlewood D. J. Simulation of dynamic fracture using peridynamics, finite element modeling, and contact / D. J. Littlewood // ASME International mechanical engineering congress and exposition. – 2010. – T. 44465. – P. 209-217. <u>https://doi.org/10.1115/IMECE2010-</u> 40621
- Madenci E. A state-based peridynamic analysis in a finite element framework / Madenci E. et al. //Engineering fracture mechanics. – 2018. – T. 195. – P. 104-128. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.03.033
- Yang D. effective correspondence-based peridynamics-FEM coupling model for brittle fracture / D. Yang, X. He, Y. Deng //International Journal of Mechanical Sciences. – 2024. – T. 264. – P. 108815. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.03.033
- Lemaitre J. Mechanics of solid materials./ J. Lemaitre, J. L. Chaboche // Cambridge: University press, 1994. – 556 p.
- 15. Parks M. L. Peridigm users' guide. V1. 0.0. / Parks M. L. et al. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2012. – №. SAND2012-7800.
- Docker Documentation. (2024). Docker Overview. Retrieved from <<u>https://docs.docker.com/get-started/overview/</u>>
- 17. Kamaldeep Programming for Problem-solving with C. Formulating algorithms for complex problems. / Kamaldeep. 2023. 480 p.

#### **References (transliterated)**

- Stronge W. J. Impact mechanics. Cambridge university press, 2018. 353 p. <u>https://doi.org/10.1017/9781139050227</u>
- Walker J. D. Modern impact and penetration mechanics. Cambridge university press, 2021. 694 p. https://doi.org/10.1017/9781108684026
- 3. Alves M. Impact Engineering: Fundamentals, Experiments, Nonlinear Finite Elements. CRC Press, 2024.460 p. https://doi.org/10.1201/9781003485292
- 4. Hallquist, J.: LS–Dyna theory manual: LSTC (Livermore Software Technology Corporation). 2018
- Lahe Motlagh P., Kefal A. Comparative study of peridynamics and finite element method for practical modeling of cracks in topology optimization. Symmetry. – 2021. – T. 13. – №. 8. – P. 1407. https://doi.org/10.3390/sym13081407
- Bobaru, F., Foster, J. T., Geubelle, P. H., Silling, S. A, Handbook of peridynamic modeling. 2016. CRC press, 586 p. https://doi.org/10.1201/9781315373331
- 7. Silling, S. A.; Askari, E.: A meshfree method based on the peridynamic model of solid mechanics. Computers & Structures. 83 (17–18), 2005.
  P. 1526–1535. <u>https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.11.026</u>
- Guozhe S. et al. Large deformation and fracture analysis of thin plate bending based on peridynamics *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2023. T. 55. №. 2. P. 381-389.
- Jafaraghaei Y., Yu T., Bui T. Q. Peridynamics simulation of impact failure in glass plates. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022. T. 121.C. 103424.

https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103424

- Wang H., Oterkus E., Oterkus S. Predicting fracture evolution during lithiation process using peridynamics. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018. T. 192. P. 176-191. <u>https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.02.009</u>
- Littlewood D. J. Simulation of dynamic fracture using peridynamics, finite element modeling, and contact. ASME International mechanical engineering congress and exposition. 2010. T. 44465. P. 209-217. https://doi.org/10.1115/IMECE2010-40621
- 12. Madenci E. et al. A state-based peridynamic analysis in a finite

element framework. *Engineering fracture mechanics*. 2018. T. 195. – P. 104-128. <u>https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.03.033</u>

- Yang D., He X., Deng Y. An effective correspondence-based peridynamics-FEM coupling model for brittle fracture. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2024. T. 264. P. 108815. <u>https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.03.033</u>
- Lemaitre J., Chaboche J. L. Mechanics of solid materials. Cambridge: University press, 1994. 556 p.
- 15. Parks M. L. et al. Peridigm users' guide. V1. 0.0. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2012. №. SAND2012-7800.
- Docker Documentation. (2024). Docker Overview. Retrieved from https://docs.docker.com/get-started/overview/
- 17. Kamaldeep Programming for Problem-solving with C. Formulating algorithms for complex problems. 2023. - 480 p. Надійшла (received) 29.11.2024

## Відомості про авторів/ About the Authors

*Бондарь Сергій Володимирович* — кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; тел.: (057)707-64-54; ORCID: <u>https://orcid.org/0009-0006-7559-5979</u>; e-mail: <u>serhii.bondar@khpi.edu.ua</u>

*Батюк Олег Анатолійович (Batiuk Oleh)* - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; тел.: (057)707-64-54; ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0001-6762-0616</u>; e-mail: <u>oleh.batiuk@khpi.edu.ua</u>

*Бреславський Дмитро Васильович (Breslavsky Dmytro)*– доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; тел.: (057)7076454; ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0002-3792-5504</u>; e-mail: <u>Dmytro.Breslavsky@khpi.edu.ua</u>