

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор інституту прикладних проблем  
механіки і математики ім. Я. С. Підстригача  
НАН України, академік НАН України,  
доктор фізико-математичних наук



Роман КУШНІР

« 7 02

2024 р.

## ВІСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації  
Стасюка Богдана Мирославовича на тему: «Гранично-елементний аналіз пружних  
властивостей тривимірних композитних структур з неканонічними включеннями  
та дефектами», поданої на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 –  
«механіка деформівного твердого тіла»

Робота заслухана на засіданні наукового семінару відділу обчислювальної  
механіки деформівних систем Інституту прикладних проблем механіки і матема-  
тики ім. Я. С. Підстригача НАН України (протокол № 1 від 2.02 2024 р.),  
на якому доповідач виклав основні положення та результати дисертаційної роботи.  
На всі запитання Стасюк Б.М. дав правильні і ґрутовні відповіді.

**1. Актуальність теми.** Чисельне моделювання стало поширеним способом  
аналізу складних тривимірних деформівних систем, оскільки воно забезпечує ви-  
соку продуктивність на основі повного спектру вхідних даних, пов’язаних із нава-  
нтаженням та властивостями матеріалу. Механіка композитних матеріалів є однією  
з найактуальніших областей застосування такого аналізу, оскільки композити все  
частіше витісняють традиційні конструкційні матеріали в різних інженерних засто-  
суваннях. Різноманіття властивостей композитних структур пов’язане з різною то-  
пологічною формою наповнювачів, якістю їх контакту з матрицею, характером їх  
просторового розподілу, а також наявністю внутрішніх та інтерфейсних дефектів.  
Дисертаційна робота Стасюка Б. М. має безпосереднє відношення до цього напря-  
му досліджень і спрямована на вдосконалення потенційних можливостей методів  
граничних елементів з чисельного розв’язання тривимірних задач для композитних  
тіл з об’ємними неканонічними (в тому числі і нанорозмірними) та тонкостінними

включеннями, які виступають локальними концентраторами напружень та є причиною зміни макроскопічних механічних характеристик композитних структур. Актуальність цього дослідження пов'язана також з високопродуктивним числовим моделюванням взаємодії включень різного типу, тріщин, міжфазних недосконалостей, матерілізованих поверхонь нанонеоднорідностей та розширенням можливостей гомогенізаційних схем розрахунків ефективних модулів пружності композитів на випадки наявності розривів полів переміщень та напружень на міжфазних поверхнях.

Результати цієї дисертаційної роботи урізноманітнюють методи числових досліджень (в тому числі з огляду на спроможності методу скінчених елементів) і служать поширенню знань про актуальну для практики механічну поведінку на новий клас тривимірних матричних композитів з волокнистими та дисковими наповнювачами.

2. У роботі отримані **нові результати** щодо розроблення моделей і розрахункових схем методу граничних елементів для числового визначення тривимірних полів напружень і деформацій необмежених і обмежених композитних тіл та ефективних пружних властивостей композитних середовищ з включеннями неканонічної форми з урахуванням умов їх ідеального і неідеального контакту з матрицею, а також взаємодії між включеннями та тріщинами.

Отримано граничні інтегральні формулювання таких задач із неявним задоволенням різnotипних умови контакту складових композитного тіла, що дозволило скоротити кількість розрахункових рівнянь відповідних задач. Побудовано диференціальні рівняння деформування матеріалізованої поверхні сфероциліндричної форми із забезпеченням їх узгодження на стику частин поверхні різної кривини. Розроблено схеми регуляризації та дискретизації отриманих систем сингулярних інтегральних рівнянь, в тому числі на основі інтерполяції невідомих функцій вищого порядку, що співпадає з порядком топологічної параметризації граничних елементів. Алгоритми дискретизації поширені на системи дуальних інтегральних рівнянь, які описують тривимірну взаємодію об'ємних і тонкостінних включень та плоских тріщин у пружному тілі, а також їх взаємодію з його просторовою поверхнею. Задіяно принцип одностороннього впливу множинних концентраторів

напружень для ефективного опису тривимірної взаємодії включень різних типів та тріщин. Встановлено і використано конструктивну роль граничноелементних розв'язків тривимірних задач для композитних тіл у співвідношеннях гомогенізації композитних середовищ з визначення їх ефективних модулів пружності.

В роботі подано належне **обґрунтування** та забезпеченіо багаторівневу **верифікацію** отриманих результатів, зокрема перевіркою збіжності числових розв'язків за зміни типу або густини дискретизаційних сіток міжфазних областей та поверхонь тріщин; узгодженням результатів з розв'язками відомих в літературі модельних задач для канонічних включень. Окремі результати числового розрахунку підтвердженні скінченноелементним моделюванням та проведеним в роботі експериментом.

Дослідження частково виконувались за грантової підтримки Науково-технологічного центру в Україні і держбюджетних відомчих та цільових тем Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України та НУ «Львівська політехніка».

**3. Теоретичне та практичне значення роботи** полягає у застосуванні її підходів та результатів в області проектування композитних матеріалів з керованою анізотропією та наперед заданими механічними характеристиками. Пропоновані алгоритми розрахунку через включення в розрахункові моделі таких факторів, як форма та розташування наповнювачів, наявність міжфазних дефектів та тонких внутрішніх концентраторів напружень, врахування взаємодії між ними, можуть покращити експлуатаційні характеристики та подовжити термін служби виробів і конструкцій, виготовлених із композитних матеріалів. Запропоновані методи чисельного моделювання придатні для прогнозування як локального розподілу полів напружень і деформацій, так і ефективних пружних характеристик мультикомпонентних деформівних структур. Отримані розрахункові дані щодо впливу натягу та власної пружності міжфазних поверхонь на пружні властивості наноструктурованих композитів можна використовувати для розв'язування інженерних задач у галузі наномеханіки.

4. Публікації та висновок про особистий внесок здобувача в отримання наукових результатів та в працях, написаних у співавторстві. За темою дисертації опубліковано 35 наукових праць. Серед них 18 статей у наукових фахових виданнях України і у наукових періодичних виданнях інших держав. 10 статей [1-10] у закордонних виданнях прореферовані у міжнародних наукометрических базах Scopus та/або Web of Science Core Collection (<https://orcid.org/0000-0001-9713-191X>, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6508070815>). 6 статей [11-16] опубліковані у виданнях, включених до категорії «А» та «Б» Переліку наукових видань України фахових у галузі фізико-математичних наук зі спеціальності механіка, 1 стаття [26] – у виданні фаховому у галузі фізико-математичних наук зі спеціальністі математика, 1 стаття [19] – у виданні фаховому у галузі технічних наук. 17 праць [17,18, 20-25, 27-35] опубліковано у матеріалах міжнародних і національних конференцій.

З урахуванням квартильності видань відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank ([1] входить до квартилю Q1, [4, 10] входить до квартилю Q2, [2, 3, 5-9] входять до квартилю Q3) кількість наукових публікацій, які розкривають основний зміст дисертації, становить 29.

Здобувачем одноосібно опубліковано 21 працю [3, 5, 6, 9, 12-16, 19-24, 28, 29, 31-33, 35].

1. Mykhas'kiv V.V., Stasyuk B.M. Stress intensification due to the crack outside/inside a finite fiber in 3-D elastic matrix. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2015. Vol. 80. P. 133–142. ([10.1016/j.tafmec.2015.10.002](https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2015.10.002)).
2. Mykhas'kiv V.V., Stasyuk B.M. Effective Elastic Properties of 3D Composites with Short Curvilinear Fibers: Numerical Simulation and Experimental Validation. *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 258. P. 452–455. ([10.4028/www.scientific.net/SSP.258.452](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.258.452)).
3. Stasyuk B.M. Interacting cracks 3D analysis using boundary integral equation method. *AIMS Materials Science*. 2016. 3(4). P. 1796–1810. ([10.3934/mater-sci.2016.4.1796](https://doi.org/10.3934/mater-sci.2016.4.1796)).
4. Михаськів В.В., Стасюк Б.М. О численном решении трехмерных статических задач теории упругости для тела с включением неканонической формы.

- Прикладная механика.* 2007. 43 (4). С. 27–35. Те саме: Mykhas'kiv V.V., Stasyuk B.M. Numerical solution of three-dimensional static problems of elasticity for a body with a noncanonical inclusion. *International Applied Mechanics.* 2007. 43 (4). P. 380–387. (10.1007/s10778-007-0033-7).
5. Стасюк Б.М. Метод ефективного поля напружень в тривимірних задачах про взаємодію плоских тріщин. *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* 2009. 45 (1). С. 33–42. Те саме: Stasyuk B.M. Method of effective stress field in three-dimensional problems of interaction of plane cracks. *Materials Science.* 2009. 45(1). P. 28–40. (10.1007/s11003-009-9157-8).
6. Стасюк Б.М. Вплив газонаповненої порожнини складної форми на напруження в околі сусідньої тріщини. *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* 2013. 49 (6). С. 28–35. Те саме: Stasyuk B.M. Influence of a Gas-Filled Cavity of Complex Shape on Stresses in the Vicinity of a Neighboring Crack. *Materials Science.* 2014. 49 (6). P. 734–742 (10.1007/s11003-014-9668-9).
7. Михаськів В.В., Стасюк Б.М. Упругое состояние включения неканонической формы при условии скользящего контакта с трехмерной матрицей. *Прикладная механика.* 2015. 51 (6). С. 42–51. Те саме: Mykhas'kiv V.V., Stasyuk B.M. Elastic State of a Sliding Short Fiber Inclusion in a Three-Dimensional Matrix. *International Applied Mechanics.* 2015. 51 (6). P. 640–647. (10.1007/s10778-015-0720-8).
8. Стасюк Б.М., Крет Н.В., Звірко О.І., Штойко І.П. Аналіз напруженого стану труби газопроводу з макродефектом, ініційованим воднем. *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* 2019. 55 (1). С. 113–118. Те саме: Stasyuk B. M., Kret N.V., Zvirko O.I., Shtoiko I.P. Analysis of the Stressed State of a Pipe of Gas Pipeline with Hydrogen-Induced Macrodefect. *Materials Science.* 2019. 55 (1). P. 1–6. (10.1007/s11003-019-00259-2).
9. Стасюк Б.М. Ефекти від поверхневого натягу сфероциліндричної нанопори у пружному середовищі. *Математичні методи та фізико-механічні поля.* 2019. 62 (3). С. 48–56. Те саме: Stasyuk B.M. Effects of the surface tension of a spherical-cylindrical nanopore in the elastic medium. *Journal of Mathematical Sciences.* 2022. 263 (1). P. 52–61. (10.1007/s10958-022-05906-9).
10. Михаськів В.В., Стасюк Б.М. Эффективные модули упругости

- коротковолокнистого композита при скользящем контакте на межфазных поверхностях. *Механика композитных материалов.* 2021. 57 (5). С. 901–916. Те же: Mykhas'kiv V.V., Stasyuk B.M. Effective elastic moduli of short-fiber composite with sliding contact conditions at interfaces. *Mechanics of Composite Materials.* 2021. 57 (5), P. 635–646. (10.1007/s11029-021-09985-8).
11. Хай М.В., Станкевич В.З., Стасюк Б.М. До теорії механіки руйнування. *Машинознавство.* 2002. № 11. С. 3–19.
  12. Стасюк Б.М. Розмірні ефекти динамічної взаємодії тріщин. *Машинознавство.* 2005. № 2. С. 17–21.
  13. Стасюк Б.М. Напружений стан гранульованих композитів у випадку рівності коефіцієнтів Пуассона матеріалів матриці і включення. *Машинознавство.* 2006. № 5. С. 14–22.
  14. Стасюк Б.М. Приближенное аналитическое решение задачи о взаимодействии компланарных дискообразных трещин в упругом пространстве. *Теоретическая и прикладная механика.* 2008. Вып. 44. С. 48–54.
  15. Стасюк Б.М. Вплив міжфазного шару на напружений стан об'ємного пружного включення. *Машинознавство.* 2009. № 10. С. 9–14.
  16. Стасюк Б.М. Напруження у порожнистому циліндрі, послабленому множинними тріщиноподібними дефектами. *Допов. НАН України. Механіка.* 2021. № 3. С. 33–39.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

17. Хай М.В., Стасюк Б.М. Про спрощення розрахунку на міцність пружних тіл, що містять плоскі тріщини. *5-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові:* тези доп. (Львів, 16-18 травня 2001). Львів: КІНДПАТРІ ЛТД. 2001. С. 16–17.
18. Хай М.В., Стасюк Б.М. Модифікований метод граничних інтегральних рівнянь при розрахунку на міцність тіл, послаблених великою кількістю взаємодіючих тріщин. *6-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові:* тези доповіді. (Львів, 21-23 травня 2003). Львів: КІНДПАТРІ ЛТД. 2003. С. 44.

19. Стасюк Б.М. Про міцність тіла, послабленого плоскою неоднозв'язною тріщиною з коловими контурами. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Динаміка, міцність та проектування машин і приладів.* 2003. № 483. С. 90–97.
20. Стасюк Б.М. Визначення концентрації напружень в околі багатозв'язної плоскої тріщини з внутрішніми контурами змінної кривини. *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій:* Матеріали 3-ї міжнародної конференції під редакцією В.В. Панасюка. (Львів, 2004). Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. 2004. С. 333–340.
21. Стасюк Б.М. Розмірні ефекти динамічної взаємодії тріщин. *7-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові:* тези доп. (Львів, 18-20 травня 2005). Львів: КІНДПАТРІ ЛТД. 2005. С. 44.
22. Стасюк Б.М. Вплив наявності тріщин на напруженій стан гранульованого композита. *8-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові:* тези доп. (Львів, 23-25 травня 2007). Львів: КІНДПАТРІ ЛТД. 2007. С. 53.
23. Стасюк Б.М. Взаємодія тріщин та порожнин складної форми у безмежному пружному тілі. *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення та експлуатації машинобудівних конструкцій:* тези доп. 2-ї міжнародної конференції. (Львів, 22-24 жовтня, 2008). Львів: КІНДПАТРІ ЛТД. 2008. С. 77–78.
24. Стасюк Б.М. Вплив міжфазного шару на напруженій стан об'ємного пружного включення. *9-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові:* тези доп. (Львів, 20-22 травня 2009). Львів: КІНДПАТРІ ЛТД. 2009. С. 100–102.
25. Стасюк Б.М., Кіндрацький Б.І. Взаємодія в безмежному тілі плоских тріщин та тонких пружних включень малої жорсткості. *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій.* Матеріали 4-ї міжнародної конференції під ред. З. Назарчука, Б.І. Кіндрацького. (Львів, 11-13 листопада, 2010). Львів: КІНДПАТРІ ЛТД. 2010. – С. 485–490.
26. Станкевич В.З., Стасюк Б.М., Децик Т.Б. Границно-рівноважний стан бруса круглого попереччя з внутрішньою тріщиною під поперечним згином. *Вісник НУ „Львівська політехніка”, фізико-математичні науки.* 2011. № 718. С. 81–85.

27. Kindratsky B. I., Stasiuk B. M. Three-dimensional elastic problem for a limited bodies with crack. *Fracture Mechanics of Materials. Proc. Second Ukrainian-Greek Symposium* (Lviv, October 3–7 2011). Lviv: SPOLOM. 2011. P. 39–42.
28. Стасюк Б. М. Пружна рівновага об'ємного включення довільної форми, що містить плоску тріщину. 10-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: тези доп. (Львів, 25-27 травня 2011). Львів: КІНДПАТРІ ЛТД. 2011. С. 114–116.
29. Стасюк Б. М. Взаємодія газонаповнених об'ємних порожнин у пружному тілі. *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення та експлуатації машинобудівних конструкцій*: тези доп. 3-ї міжнародної конференції. (Львів, 7-9 листопада, 2012). Львів: КІНДПАТРІ ЛТД. 2012. С. 56–57.
30. Михаськів В.В., Стасюк Б.М. Концентрація напружень в околі плоскої тріщини та об'ємного пружного включення за умови їх взаємодії. *Сучасні проблеми механіки і математики*. Збірник наукових праць т. 2. Під ред. Р.М. Кушніра, Б.Й. Пташника. Львів. 2013. С. 74–76.
31. Стасюк Б.М. Модель гладкого контакту об'ємного пружного включення довільної форми з безмежним тілом. 11-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: тези доп. (Львів, 15-17 травня 2013). Львів: КІНДПАТРІ ЛТД. 2013. С. 54–55.
32. Стасюк Б.М. Напружене-деформований стан магістрального трубопроводу, послабленого приповерхневою осьовою тріщиною. *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення та експлуатації машинобудівних конструкцій*: тези доп. 4-ї міжнародної конференції. (Львів, 30-31 жовтня, 2014). Львів: КІНДПАТРІ ЛТД. 2014. С. 91–92.
33. Стасюк Б.М. Експериментальне та теоретичне визначення ефективних модулів пружності фібробетону. *Математичні проблеми механіки неоднорідних структур*: збірник наук. праць ІХ Міжнародної наукової конференції за ред. І.О. Луковського, Г.С. Кіта, Р.М. Кушніра. Львів: ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАНУ. 2014. С. 156–158.
34. Myk'as'kiv V. V., Stasyuk B. M. Effective elastic properties of 3D nanocomposites reinforced by short-fiber with Gurtin-Murdoch model of interphase. *Nanotechnology*

*and nanomaterials. Abstract Book of participants of the international research and practice conference. (Kyiv, August 27-30). Kyiv: SME Burlaka. 2018. P. 243.*

35. Стасюк Б.М. Моделювання поверхневого натягу в тривимірних нанокомпозитах за умови змінної кривини міжфазної поверхні. *Математичні проблеми механіки неоднорідних структур*. Збірник наукових праць X Міжнародної наукової конференції за ред. Р.М. Кушінра, Г.С. Кіта. Львів: ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАНУ. 2019. С. 144–145.

Опубліковані праці повно висвітлюють основний зміст дисертації.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наведені в роботі основні наукові результати, положення, моделі, висновки та рекомендації отримано автором самостійно. У працях [1, 2, 4, 8, 10, 26], опублікованих у співавторстві, автору належать розвиток і реалізація підходів до розв'язання поставлених задач, участь у математичному моделюванні об'єкту досліджень та розробці методики числового моделювання, інтерпретація отриманих результатів. У статтях [7, 11, 17] автору належить розвиток і реалізація підходів до розв'язання поставлених задач, чисрова реалізація моделей та участь в інтерпретації отриманих результатів. В роботах [18, 25, 27, 30, 34] автору належить ідея дослідження і її чисрова реалізація.

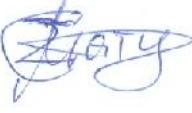
5. Дисертація та автoreферат оформлені відповідно до «Основних вимог до дисертацій та рефератів дисертацій». Дисертаційна робота має логічну структуру й складається зі взаємопов'язаних частин – від гранично-інтегральних формулувань тривимірних задач теорії пружності для композитних тіл та алгоритмів регуляризації і дискретизації систем інтегральних рівнянь до розв'язання їх дискретних аналогів та інкорпорації розв'язків у гомогенізаційні схеми для опису ефективних механічних властивостей композитних середовищ. Ці складові частини у сукупності вирішують сформульовану мету дослідження. Мова та стиль подання матеріалу зрозумілі для сприйняття та відповідають дисертаційним вимогам.

Дисертаційна робота Б.М. Стасюка відповідає спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла і профілю спеціалізованої вченої ради Д 35.195.01 в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України.

За актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень, новизною отриманих

результатів, їх науковою та практичною значимістю, кількістю та якістю опублікованих праць дисертація відповідає вимогам п. 7 та 9, «Порядку присудження та по-збавлення наукового ступеня доктора наук» (Постанова Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197, м. Київ зі змінами внесеними згідно з Постановою КМ № 502 від 19.05.2023) за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

**Рецензенти:**

доктор фіз.-мат. наук, пров. наук. спів.  Валерій МАТУС  
відділу обчислюальної механіки  
деформівних систем

доктор фіз.-мат. наук, завідувач  
відділу механіки деформівного  
твердого тіла



Юрій ТОКОВИЙ

доктор фіз.-мат. наук, пров. наук. спів.  Віктор ШЕВЧУК  
відділу механіки деформівного  
твердого тіла