

ВИСНОВОК
про наукову новизну, теоретичне та практичне значення
результатів дисертації

Білоуса Дмитра Олександровича

на тему «Процеси теплоперенесення та напружено-деформаційні поля у багат шарових наноструктурних системах», поданої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Характеристика особистості здобувача

Білоус Дмитро Олександрович у 2018 році закінчив Сумський державний університет за спеціальністю «Прикладна математика», освітній рівень «Бакалавр»; з 2018 по 2019 рр. навчався у Сумському державному університеті за спеціальністю «Прикладна математика» за освітнім рівнем «Магістр». З 2020 р. до 2023 р. включно був здобувачем наукового ступеню доктора філософії в Сумському державному університеті за спеціальністю 104 Фізика та астрономія, а з 2024 був переведений на спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики.

Тему дисертації у останній редакції затверджено на засіданні Вченої ради СумДУ (протокол № 5 від «12» грудня 2024 р.).

За час навчання в аспірантурі Білоус Д.О. зарекомендував себе сумлінним, відповідальним та високопрофесійним науковим працівником. Він опанував сучасні наукові методики та оволодів інноваційними підходами до здійснення наукових досліджень.

Білоус Д.О. прийняв участь у таких всеукраїнських та міжнародних науково-практичних конференціях: 7-й Міжнародній науковій конференції «Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2017)» (Затока, Україна, 2017 р.); Міжнародній науковій конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика-2018» (Львів, Україна, 2018 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2019)» (Суми, Україна, 2019 р.); 10-й Міжнародній науковій конференції «Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2020)» (Україна, 2020 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ - 2021)» (Суми, Україна, 2021); Міжнародній науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ - 2022)» (Суми, Україна, 2022); 13-й Міжнародній науковій конференції «Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2023)» (Братислава, Словацька Республіка, 2023 р.); Міжнародній

науково-технічній конференції «Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2023)» (Суми-Астана, Україна-Казахстан, 2023 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку» (Черкаси, Україна, 2019 р., 2021 р.); ІХ Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2022)» (Суми, Україна, 2022 р.), Х Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2023)» (Суми, Україна, 2023 р.); 14-й Міжнародній науковій конференції «Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2024)» (Рига, Латвія, 2024 р.)

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Сучасні темпи розвитку промисловості вимагають нових технологічних рішень, які приводять до необхідності суттєвого покращення функціональних властивостей матеріалів та експлуатаційних характеристик приладів на їх основі за рахунок варіювання складу, структури та властивостей багатошарових покриттів.

Вплив теплового навантаження на багатошарову структуру – важливий аспект технологічних процесів в електроніці, техніці, металообробці та в багатьох інших галузях, який значно впливає на фізико-механічні характеристики елементів систем. Важливим стає питання встановлення значень максимальних температур, які досягаються на різних ділянках пластин із нанесеними покриттями, інтенсивності поширення теплового поля, глибини проникнення теплової енергії тощо. Особливо важливим це питання стає при розгляді нітридних багатошарових покриттів на основі TiC і TiCN, що нанесені на контактуючу поверхню ріжучих інструментів. Визначення відповідних теплофізичних параметрів під час експериментальних досліджень пов'язано із складнощами: миттєвістю процесу поширення теплового потоку, наявністю широкого спектру градієнтів температур та великих значень швидкостей нагріву й охолодження. Тому теоретичне дослідження цих аспектів постійно знаходиться в полі зору науковців.

Складні особливості еволюції системи не дозволяють сформувати повну картину розподілу температурних полів. Це питання залишається актуальним, так як отримані результати дозволять за допомогою розрахункових методів встановити характер теплових полів ще до проведення дослідів на реальних зразках і, як наслідок, скоротити витрати часу й ресурсів.

Слід відзначити, що поряд із тепловими полями на стан та фізико-механічні характеристики покриттів впливають напружено-деформаційні поля. В останні роки активно розвивається підхід до дослідження деформаційних процесів у поверхневих шарах, заснований на концепції

структурних рівнів деформації та руйнування твердих тіл, а також на розумінні в рамках цієї концепції особливої ролі поверхні та поверхневих шарів покриттів у зародженні та зміні деформаційних процесів. Але він має свої недоліки та не формує повного уявлення про відповідні фізико-механічні процеси у багатошарових покриттях.

З появою нових матеріалів і технологій, навантаження у вузлах контакту поверхонь, постійно зростає, що, в свою чергу, приводить до підвищення температурного пливу та формування напружено-деформаційних полів. Дослідження, розрахунок напружено-деформованого стану структури із багатошаровим покриттям є дуже важливим, так як покриття є зоною ймовірної втрати міцності та руйнування конструкції. Тому адекватне встановлення особливостей напружено-деформованого поля в цій структурі дозволить врахувати їх при конструюванні механізмів, що збільшить ресурс роботи відповідних елементів.

Для ефективного вирішення поставлених проблем необхідні результати теоретичного аналізу та прогнозування деформаційно-напружених процесів в багатошаровій структурі покриття під дією теплових навантажень. Тому актуальним є проведення дослідження еволюції та кінетики зміни деформаційно-напружених характеристик у пластині із нанесеним багатошаровим покриттям на основі TiC і TiCN під впливом теплового навантаження.

Зв'язок роботи з науковими програмами та темами

Дисертаційна робота виконана на кафедрі прикладної математики та моделювання складних систем Сумського державного університету. Результати дослідження отримані на основі ґрунтового аналізу деформаційних та теплових процесів, які відбуваються в багатошарових наноструктурних системах мають змістовний характер та використовувались підчас виконання держбюджетних науково-дослідних робіт: № держреєстрації 0117U002247 (2017-2019 рр.) «Технологічні основи синтезу наноструктурних нанокompозитних та багатошарових покриттів тугоплавких сполук для застосування у машинобудуванні», (виконавець);

№ держреєстрації 0121U112687 (2019-2021 рр.) «Встановлення закономірностей взаємозв'язку між структурним станом, механічними можливостями і режимами іонно-плазмової обробки нанокompозитних карбонітридних покриттів та розробка технологічних основ і обладнання для іонно-плазмового азотування матеріалів», (виконавець);

№ держреєстрації № 0119U100787 (2019-2021 рр.) «Імплантація іонів низьких та високих енергій у багатокомпонентні та багатошарові покриття: мікроструктура та властивості», (виконавець);

№ держреєстрації 0122U000776 (2020-2022 рр.) «Відпрацювання умов синтезу наноструктурних покриттів із заданим структурним станом» (виконавець).

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій, що сформульовані в дисертації

Дисертаційне дослідження Білоуса Дмитра Олександровича виконано на високому методичному рівні з використанням комплексу сучасних теоретичних методів дослідження. Основні наукові положення та висновки, сформульовані в дисертації, логічно випливають із одержаних результатів та є достатньо обґрунтованими. Вони відповідають поставленій меті та завданням дослідження. Чітко структуровано основні напрямки дослідження, зокрема питання дослідження процесу теплоперенесення та встановлення напружено-деформованого стану наноструктурних покриттів. Результати досліджень доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях, а також опубліковані в наукових міжнародних та фахових виданнях. Про достовірність отриманих результатів свідчить їх взаємоузгодженість та відповідність літературним даним.

Наукова новизна результатів

У результаті дослідження представлені положення та висновки, що містять елементи наукової новизни, зокрема:

1. Уперше охарактеризована інтенсивність поширення теплового потоку в пластині без покриття, із одношаровим TiN/42CrMo4 та двошаровим TiN/ α -Al₂O₃/42CrMo4 покриттями. Визначена доля теплового потоку, яка втрачається при віддаленні від поверхні для одношарового та двошарового покриття відповідної товщини.

2. Уперше порівняно динаміку поширення температурного поля в ріжучій пластині без покриття і в пластині із тришаровим покриттям TiCN/ α -Al₂O₃/TiN.

3. Уперше, методом фазового простору, вивчений стан багатошарової структури ріжучої пластини в рамках моделі в'язко-пружного середовища, що володіє теплопровідністю. Подано фазовий портрет, що описує динаміку термонапруженого стану структури. Встановлені умови переходу пружної деформації до пластичної при варіюванні параметрами термонапруження у багатошаровому покритті.

4. На основі фазового портрету напружено-деформованого стану системи показано кінетику зміни деформаційних характеристик системи шляхом відслідковування еволюції деформацій і дослідження швидкості їх зміни.

Практичне значення отриманих результатів

Результати дослідження теплового поля, динаміки поширення теплового потоку, еволюції та кінетики зміни деформаційно-напружених характеристик системи у пластині із нанесеним багат шаровим покриттям під впливом теплового навантаження структури, можуть бути використані для прогнозування параметрів і характеристик функціональних матеріалів елементів металообробного обладнання, розробки технологічних процесів підготовки ріжучих інструментів, та формуванні рекомендацій щодо оптимізації структури нанесених покриттів.

Повнота викладу матеріалів дисертації в опублікованих працях, персональний внесок здобувача

Результати дисертаційної роботи опубліковано у 23 працях, з яких 5 статей у журналах, що індексуються наукометричними базами Scopus та/або Web of Science Core Collection та належать до кватилів Q2–Q4, та 4 статті у матеріалах міжнародних наукових конференцій, що індексуються наукометричною базою Scopus, 15 тез доповідей. В опублікованих працях автором в повному обсязі висвітлені основні наукові положення, результати та висновки дисертації. Наукові положення та результати досліджень, що отримані дисертантом, проходили апробацію та доповідалися на наукових конференціях різного рівня, як національного, так і міжнародного.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях, які індексуються наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science

1. A. Goncharov, A. Yunda, E. Mironenko, **D. Belous**, L. Vasilyeva, Effect of a Protective Coating on the Temperature Distribution in a Revolving Cutting Tool and the Cutting Tool Lifetime, High Temperature Material Processes: An International Quarterly Journal of High-Technology Plasma Processes, Vol. 22, № 4, 2018, P. 279–291. doi: 10.1615/HighTempMatProc.2018029411. (Scopus, WoS)
2. A. Goncharov, A. Yunda, E. Mironenko, L. Vasilyeva, **D. Belous**, Effect of multilayer protective coating on the thermal field dynamics in the cutting tool during machining, High Temperature Material Processes: An International Quarterly Journal of High-Technology Plasma Processes, Vol. 24, 2020, P. 81–90. doi: 10.1615/HighTempMatProc.2020033202. (Scopus, WoS)

3. **D. A. Belous**, A. Yu. Badalian, A. A. Goncharov, O. V. Khomenko, and S. A. Goncharova, Influence of Protective Nanocomposite Coatings on the State of Thermal and Strain Fields in Cutting Plate, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, Vol. 44, № 11, 2022, P. 1495-1508. doi: 10.15407/mfint.44.11.1495. (Scopus)

4. A. Goncharov, **D. Belous**, A. Yunda, O. Khomenko, E. Mironenko, L. Vasilyeva, S. Goncharova, Heat transfer processes in multilayer nanocomposites systems during cutting, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, Vol. 20, № 2, 2022, P. 385–422. doi: 10.15407/nnn.20.02.385. (Scopus)

5. **D. A. Belous**, A. Yu. Badalian, A. A. Goncharov, O. V. Khomenko, Investigation of the Strain-Stress Field in Nanoscale Multilayer Systems by the Phase Space Method, *Materials*, Vol. 17, № 10, 2024, P. 2466. doi: 10.3390/ma17102466. (Scopus, WoS)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. A. A. Goncharov, A. N. Yunda, S. A. Goncharova, **D. A. Belous**, S. V. Koval, L. V. Vasilyeva, Dependence of the thermal field in the coated cutting insert on the cutting conditions, 2017 IEEE 7th International Conference «Nanomaterials: Application & Properties» (NAP-2017), Odessa, Ukraine, 2017, pp. 01FNC19-1 – 01FNC19-5. doi: 10.1109/nap.2017.8190209 (Scopus).

7. **D. A. Belous**, A. A. Goncharov, Modeling of a thermal field in the cutting insert protected by multilayered coating, Міжнародна наукова конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Єврика-2018». Львів, Україна, 15-17 травня 2018, С. 36.

8. О. А. Гончаров, Є. В. Мироненко, А. М. Юнда, Л. В. Васильєва, С. В. Коваль, **Д. О. Білоус**, Моделювання теплового поля в ріжучій пластині в залежності від режимів різання, II Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод»: ДДМА, Україна, 19–21 квітня 2018 р. С. 134-136.

9. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, Моделювання поширення теплового потоку у різальній пластині з багатошаровим покриттям, Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, математика, автоматика» (ІМА-2019). Суми, Україна, 23 - 26 квітня 2019 р., С. 202.

10. **D. Belous**, A. Goncharov, A. Yunda, A. Khomenko, L. Vasilyeva, S. Goncharova Influence of Protective Nanocomposite Coatings on the State of Heat Flow in the Cutting Insert, 2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP), Ukraine, 9 -13 November 2020, pp. 01TFC22-1-01TFC22-3. doi: 10.1109/NAP51477.2020.9309548 (Scopus)

11. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, Вплив нанорозмірних багатошарових структур на динаміку температурного поля в зоні металообробки, Міжнародна науково-технічна конференція «Фізика, електроніка, електротехніка» (ФЕЕ -2021). Суми, Україна, 19 - 23 квітня 2021, С. 43.

12. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, С. А. Гончарова, Л. В. Васильєва, Т. Р. Кравченко, С. М. Пінчук, Моделювання поширення теплового навантаження на ріжучу поверхню інструменту із нанесеним багат шаровим покриттям, V Всеукраїнська науково-практична конференція «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод», Україна, 23-24 квітня 2021 р., С. 74-75.

13. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, О. В. Хоменко, С. М. Пінчук, «Вплив покриття на коефіцієнт тертя між інструментом та стружкою і заготовкою», Міжнародна наукова конференція молодих учених «Інформатика, математика, автоматика» (ІМА-2022). Суми, Україна, 18 - 29 квітня 2022, С. 157.

14. О. В. Хоменко, О. А. Гончаров, А. Ю. Бадалян, Т. П. Кравченко, Р. Р. Чернущенко, **Д. О. Білоус**, М. В. Захаров, «Врахування деформаційного дефекту модуля зсуву матеріалу при інтенсивній пластичній деформації поверхні», Міжнародна наукова конференція молодих учених «Інформатика, математика, автоматика» (ІМА-2022). Суми, Україна, 18 - 29 квітня 2022, С. 156.

15. **D. Belous**, A. Goncharov, A. Badalian, O. Khomenko, Study of Thermomechanical Properties of Multilayer Nanocomposite Film Systems, 2023 IEEE 13th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2023), Bratislava, Slovakia, 10-15 September, 2023, pp. MTFC15-1-MTFC15-4, doi: 10.1109/NAP59739.2023.10310893. (Scopus)

16. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, О. В. Хоменко, А. Ю. Бадалян, Моделювання процесів пластичної деформації у ріжучих поверхневих шарах металообробного інструменту, Міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, математика, автоматика» (ІМА-2023). Суми, Україна - Астана, Казахстан, 24 - 28 квітня 2023, С. 292.

17. A. Badalian, A. Khomenko, O. Goncharov, **D. Belous**, O. Lytvynenko, A. Biesiedina, Modeling of the Stress-Strain State in Multilayer Film Systems Depending on the Thermal Load, 2024 IEEE 14th International Conference «Nanomaterials: Applications & Properties» (NAP-2024), Riga, Latvia, 8-13 September, 2024, pp. 1-4, doi:10.1109/NAP62956.2024.10739692 (Scopus)

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

18. Є. В. Мироненко, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, Л. В. Васильєва, С. В. Коваль, **Д. О. Білоус**, Дослідження теплового поля твердосплавних пластин з багат шаровим покриттям, Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, № 2 (44), 2018, С. 214 – 218.

19. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, Багат шарові покриття ріжучого інструменту в моделюванні теплових процесів, Всеукраїнська науково-практична конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку». Черкаси, Україна, 15-21 березня 2019, С. 138-139

20. **Д. О. Білоус, О. А. Гончаров, А. М. Юнда**, Моделювання теплового поля у різальній пластині з багатошаровим покриттям, Всеукраїнська науково-практична конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку». Черкаси, Україна, 11-17 березня 2019, С. 128.

21. **Д. О. Білоус, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, Л. В. Васильєва, С. А. Гончарова, Т. Р. Кравченко, С. М. Пинчук**, Моделювання поширення теплового навантаження на ріжучу поверхню інструменту із нанесеним багатошаровим покриттям, Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод» : ДДМА, 2021, С. 74-75.

22. **Д. О. Білоус, О. А. Гончаров**, Аналіз моделей тертя в зоні обробці матеріалів ріжучим інструментом із багатошаровим покриттям, IX Всеукраїнська науково-технічної конференція «Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2022)». Суми, Україна, 19-22 квітня 2022, С. 79.

23. **Д. О. Білоус, О. А. Гончаров**, Деформаційні процеси у поверхневих структурах різальних інструментів, X Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2023)». Суми, Україна, 18-21 квітня 2023, С. 90.

Наведені публікації містять результати безпосередньої роботи здобувача на окремих етапах дослідження, повною мірою відображають основні положення та висновки роботи. Авторська участь здобувача в опублікованих наукових працях погоджена зі співавторами.

Оцінка мови та стилю дисертації. Матеріали дисертації викладено українською мовою, послідовно за формально-логічною структурою з дотриманням наукового стилю написання.

Відповідність фаху. Дисертаційна робота відповідає спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Академічна доброчесність. За результатами перевірки дисертаційної роботи Білоуса Д.О. на наявність ознак академічного плагіату встановлено коректність посилань та першоджерела для текстових та ілюстративних зазначень; навмисних спотворень не виявлено. Звідси можна зробити висновок про відсутність порушень академічної доброчесності.

Оформлення дисертації за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим МОН України,

наказ № 40 від 12.11.2017. Мова і стиль викладання дисертації точно та чітко висвітлюють одержані науково-практичні результати.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Білоуса Дмитра Олександровича на тему: «Процеси теплоперенесення та напружено-деформаційні поля у багаточарових наноструктурних системах» за актуальністю проблеми, методичними підходами, обсягом, ґрунтовністю аналізу та інтерпретацією отриманих даних, повнотою викладу принципів наукових положень, науково-теоретичним та практичним значенням повністю відповідає вимогам п. 6 «Порядку присудження ступеня доктор філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, та може бути рекомендована до подання у разову спеціалізовану вчену раду.

Голова апробаційної ради зі спеціальності
105 Прикладна фізика та наноматеріали»,
доцент кафедри ЕЗПФ,
доктор фіз-мат. наук, професор



Юрій ШКУРДОДА