

УДК 620.178.16 (045)

В. Є. МАРЧУК, Б. А. ЛЯШЕНКО, М. В. КІНДРАЧУК, О. І. ДУХОТА

Національний авіаційний університет, Україна

ЗАХИСТ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ ДИСКРЕТНИМИ ПОВЕРХНЯМИ

Представлено інноваційний характер розвитку методів створення дискретних поверхонь шляхом деформування, модифікування, нанесення плівок, покриттів, захисних шарів різними методами та їх комбінаціями для покращення триботехнічних властивостей деталей машин і механізмів. Показано проблеми та перспективи розвитку технології створення дискретних поверхонь

Ключові слова: дискретні поверхні, лазерне текстурування поверхні, дискретна структура, лунки, триботехнічні властивості

Загальна постановка проблеми та її зв'язок з науково-практичними задачами. Незважаючи на значний прогрес науки про тертя та зношування, питання підвищення зносостійкості і зменшення втрат у трибологічних системах залишаються багато в чому невирішеними. Це пояснюється складністю процесів і явищ, які відбуваються в тонких поверхневих шарах трибосполучень, дослідження яких за багатолітню історію існування науки про тертя та зношування викликає значний інтерес у трибологічному суспільстві. Економічна доцільність комплексного забезпечення якості поверхневих шарів у трибологічних системах поклато початок наукового напрямку - інженерія поверхні.

Сутність науки про інженерію поверхні полягає у розробці теорії обґрунтованого вибору форми робочих поверхонь, геометричних параметрів і фізико-хімічних властивостей, які забезпечують безвідмовність і економічну доцільність довговічності, а також у технологічному створенні таких поверхонь, їх контролі, випробуванні, зміні при експлуатації, ремонті, відновленні і утилізації [1].

За останні десятиліття інженерія поверхні набуває все більш вагоме значення у більшості галузей сучасного машинобудування. Її інноваційний характер розвитку охоплює комплекс наукових напрямків різних наук і знань, об'єднує методи цілеспрямованої зміни фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів матеріалів шляхом деформування, модифікування, нанесення плівок, покриттів, захисних шарів різними методами та їх комбінаціями. Унікальне поєднання сучасних науково-технічних засобів і досягнень, реальних потреб і стимулів ініціювали творчу атмосферу, широкомасштабне міжнародне співробітництво і привернули до сфери інженерії поверхні велику кількість науково-технічної інтелігенції [2].

Обґрунтований вибір методів інженерії для конкретних деталей і вузлів тертя представляє складну техніко-економічну задачу. Тільки методів модифікування поверхні на сьогоднішній день відома не одна сотня. Протягом найближчих десятиліть очікується ще більш бурхливий розвиток інженерії поверхні, яке стимулюватиме розробку нових технологій. Однією з таких технологій сьогодні є методи створення дискретних поверхонь, суть яких полягає в заміні традиційного суцільного шару поверхні на переривисту мозаїчно-дискретну структуру. Дискретні поверхні дозволяють забезпечити необхідну надійність і довговічність трибосполучень в екстремальних умовах експлуатації, де суцільні захисні покриття втрачають свою працездатність.

Огляд публікацій та результати аналізу. Дискретні поверхні (в закордонній літературі їх ще називають текстуrowані поверхні, плямисті покриття), як за-

сіб покращення трибологічних характеристик деталей і вузлів машин, виникли багато років назад, але широке розповсюдження отримали за останнє десятиліття як найбільш перспективний, життєздатний напрямок інжинірингу поверхні. Результатом впровадження такої технології є розширення діапазону роботи деталей в екстремальних умовах експлуатації (по допустимому навантаженню, зносостійкості, коефіцієнту тертя, фізико-механо-хімічним характеристикам пар тертя).

Аналіз методів створення дискретних поверхонь дозволив згрупувати їх у групи за наступними ознаками (рис. 1):



Рис. 1. Класифікація методів створення дискретних поверхонь

1. Формування дискретних поверхонь шляхом зміцнення робочої поверхні.
2. Формування дискретних поверхонь при різних видах обробки деталей.

При терті контактуючих поверхонь в місцях фактичного контакту формується певна шорсткість (текстура) за рахунок деформації поверхонь при одночасній дії нормальних і тангенціальних напружень з виходом на поверхню ліній ковзання та інших дислокаційних утворень. Текстурований шар характеризується дуже малою висотою і залежить від напрямку руху контактуючих поверхонь при терті. Залежно від інтенсивності та тривалості деформаційних процесів при терті текстурований шар може мати масштаб мікро-або субмікрогеометрії. Він відіграє головну роль у формуванні сил тертя і має великий вплив на пластичність металів, величину модуля пружності, антикорозійність.

Ефект текстурування проявляється стабільно за умов, характерних для протікання явища структурної пристосованості за відсутності неприпустимих процесів схоплювання. Однак при наявності патологічної пошкоджуваності текстуруваною поверхні ефект зникає. Крім того, зростання оксидних плівок на поверхні контакту також призводить до поступового зникнення ефекту текстурування [3].

Дискретна структура покриття дозволяє, на відміну від традиційного суцільного покриття, успішно застосовувати поверхнево-пластичне деформування (ППД) для отримання необхідного розміру деталі і чистоти поверхні. Застосу-

вання ППД здійснюється одночасно з нанесенням диференційного дискретного покриття до пластичного деформування глибинних шарів без розтріскування і відшарування окремих дискретних ділянок покриття. Суцільне покриття, при застосуванні ППД, розтріскується і відшарується [4].

Поліпшення мікрогеометрії контактуючих поверхонь можливо способами тонкого пластичного деформування поверхневих шарів оброблюваного матеріалу. Одним з таких способів є вібронакаткування, що створює регулярний мікрорельєф на поверхні деталей вузлів і механізмів машин. Метод вібронакаткування був розроблений Шнейдером Ю. Г. у 80-х роках минулого століття, він полягає у створенні сітки мікроканалів (дрібних жолобів) шляхом пластичної деформації металевих поверхонь з використанням твердого індентора. Після вібронакаткування плоских поверхонь контактна жорсткість і зносостійкість деталей підвищуються в 1,5–3 рази, зменшується момент рушання однієї з деталей у контактній парі в 1,5–1,7 рази, що сприяє підвищенню плавності роботи з'єднання. При сухому терті канавки працюють як пастки, що затримують в собі продукти зносу, пил і абразивні складові, завдяки чому локалізується їх руйнівна дія [5]. Велика робота з вібронакаткуванням була проведена і у Східній Європі [6].

Сьогодні активно застосовують механічний метод формування дискретних поверхонь, суть якого полягає у динамічному впливі індентора на поверхню деталі і створення заглиблень (лунок) за рахунок ППД (рис. 2). Заглибини покращують змащувальні властивості по-поверхні, підвищують опір схоплюванню і корозії, скорочують період припрацювання. Вибір оптимального розташування заглибин дозволяє конструювати поверхню з заданими експлуатаційними властивостями, поліпшити триботехнічні характеристики, знизити напружений стан поверхні [7; 8].

Хамільтон Д.Б. запропонував [9] текстурування поверхні у формі мікрошорсткостей, що виконують роль мікрогідродинамічних опор. Ця ідея здебільшого просувалася для рівнобіжного ковзання, як у випадку з механічним текстуруванням.

У США в 1984 році був запропонований метод формування дискретної поверхні для видалення продуктів зносу з електричних контактів, використовуючи технологію іонного травлення [10]. Згодом цей метод був замінений абразивною обробкою, в результаті якої поверхня мала хвилеподібну форму.

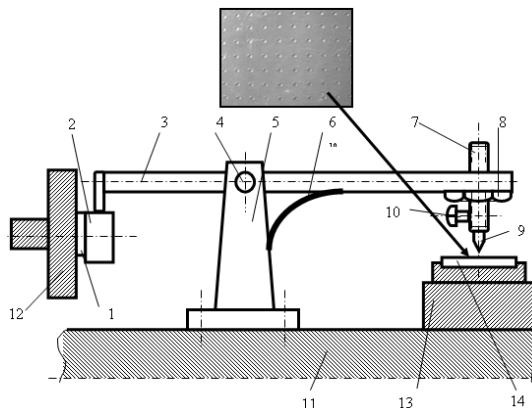


Рис. 2. Пристрій для утворення лунок: 1 – приводний вал; 2 – кулачок; 3 – коромисло; 4 – вісь коромисла; 5 – стоек осі коромисла; 6 – пружина; 7 – регулювальний гвинт; 8 – контргайка регулювального гвинта; 9 – бойок; 10 – механізм кріплення бойка; 11 – основа; 12 – патрон; 13 – механізм переміщення; 14 – деталь (зразок)

У Японії розроблено та активно застосовується реактивне іонне травлення (RIE) як метод формування дискретної поверхні у вигляді мікроямок. Були отримані задовільні результати роботи даної поверхні у водному середовищі в присутності абразиву SiC [11].

Венцель С.В. запропонував формування дискретної поверхні у вигляді мікрокаверн методом електрохімічної обробки. В результаті покращились умови припрацювання трибосполучень і зменшилось зношення у 3 рази [12].

У світовій практиці активно розвивається метод формування дискретних поверхонь з застосуванням лазерних технологій (LST). Великий об'єм науково-дослідних робіт в цьому напрямку проводиться багатьма дослідницькими групами в Німеччині, Японії, США, Швейцарії. Даний метод на сьогодні є визнано перспективним завдяки високій швидкості обробки поверхні та забезпеченню можливості регулювання і контролю форми та розмірів мікро-ямок. Такі технології знайшли застосування у різних трибосприєднаннях, механічних ущільненнях, що працюють в умовах мастильного середовища або мастильного голодування [13, 14].

Але роботи з лазерного текстуровання носять в основному експериментальний характер. Щоразу, коли проводиться спроба оптимізації параметрів дискретної поверхні, використовується метод проб і помилок. Імовірно, це є причиною великих розбіжностей при визначенні оптимальних параметрів, отриманих різними дослідницькими групами. Метод проб і помилок може мати місце тільки у випадках ковзанням без мастильного матеріалу чи в умовах недостатнього змащування, для яких теоретичні базові моделі не існують. У цих випадках мікрозаглиблення LST звичайно функціонують як мікропастки для продуктів зношування чи мікрорезервуари для зберігання мастила. Однак, в інших випадках, у яких мікрозаглибини виступають у якості мікрогідродинамічних опор, необхідно виконувати ретельне теоретичне дослідження для оптимізації параметрів LST для одержання високої зносостійкості трибосполучень. Ця ідея була поштовхом для проведення ретельних досліджень і програмних розробок в Technion-Israel Institute of Technology, результатами яких стали кілька моделей оптимізації LST у різних пристроях [15].

У 1996 р. Етсіон І. і Барштейн Л. [16] представили модель лазерного текстуровання поверхні з постійною структурою мікроповерхні, що показала істотні переваги напівсферичних мікрозаглибин (рис. 3). Моделювання здійснювалося на основі вирішення рівняння Рейнольдса для розподілу гідродинамічного тиску на поверхні і визначення оптимальних параметрів текстури поверхні для різних робочих режимів.

У роботі [17] представлені експериментальні дані, у якій були текстуровані лазером кільцеві ущільнення, які випробувані в середовищі мастильного матеріалу. Основними параметрами, які характеризують LST є діаметр і глибина мікрозаглибин та щільність поверхні (рис. 4). Встановлено [18], що фактична форма мікрозаглибин не має суттєвого значення, а найбільш значимими параметрами є співвідношення між глибиною мікрозаглиблення і його діаметром. Були оптимізовані мікрозаглибини сферичної форми на поверхні і показано, що існує оптимальна глибина мікрозаглибин при співвідношенні їх діаметра, що підвищує міцність поверхні і PV-фактор. Експериментальні дослідження текстурованої поверхні показали невеликий розбіг теоретичних і експериментальних результатів (рис. 5). Подальші дослідження LST при збільшенні навантаження приводило до поступового зниження ефекту LST [19].

В роботі [20] існує протилежна думка, що профіль мікрозаглибин суттєво впливає на ефективність змащувальної канавки. Експериментально доведено найбільшу змащувальну ефективність канавки зі сферичним профілем, у порівнянні з прямокутним і трикутним.

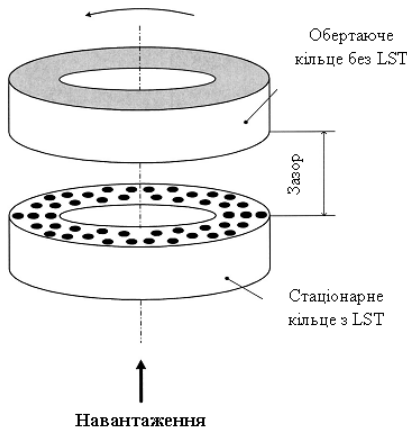


Рис. 3. Модель лазерного тестування поверхні



Рис. 4. Мікроструктура поверхні після лазерного текстурування: діаметр заглибини – 100 мкм, глибина – 10 мкм, щільність заглибин – 20%

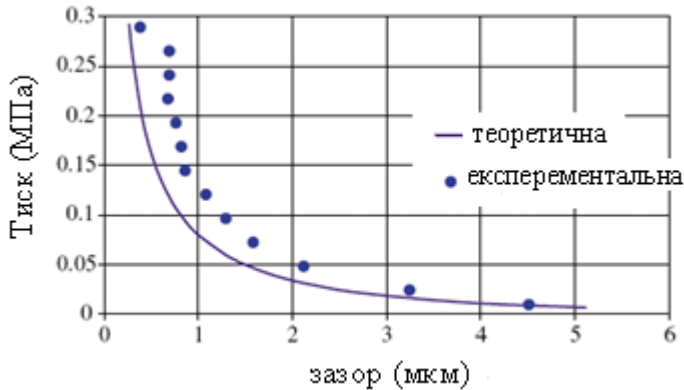


Рис. 5. Порівняння теоретичних і експериментальних результатів лазерного текстурування поверхні

Дискретна структура поверхні трибосполучень забезпечується нанесенням захисних покриттів. В інституті проблем міцності НАН України ім. Г.С. Писаренко під керівництвом Ляшенко Б.А. активно проводяться дослідження в цьому напрямку [4; 21]. Незважаючи на недостатню вивченість явищ, що відбуваються на поверхні дискретної структури, і відсутність розрахункових методів її конструювання, практична перевага її в багатьох випадках очевидна. Дискретні покриття дозволяють досягти високої адгезійної і когезійної стійкості кожної дискретної ділянки шляхом обмеження нормальних напружень у покритті і дотичних у площині адгезійного контакту покриття з основою.

Найбільш успішно дискретні покриття, нанесені методом ЕЛЛ, експлуатуються при зміцненні штампів, підвищуючи довговічність штампового оснащення в 2,6 разів, різального інструменту в 2,0 рази. Дискретне покриття тільки однієї полки верхньої кільцевої канавки поршня двигуна внутрішнього згорання знизить

ло в 4 рази сумарний знос циліндрово-поршневої групи автомобіля ВАЗ-2121 при пробігу 50 тис. км [4; 22–24].

Для захисту деталей від корозії і збільшення несучої здатності трибосполучень застосовують двошарове дискретне покриття. Покриття складається з суцільного підшару і зовнішнього шару дискретної структури. Даний принцип реалізований методом детонаційно-газового напилювання з застосуванням сітчастого екрану [19]. Сітчастий екран застосовується для отримання дискретних покриттів методом вакуум-плазмового напилювання, який розташовується між поверхнею, підкладкою і випарником. Покриття застосовувались для відновлення різців, що дозволило збільшити тривалість їх роботи у 4 рази [25].

Широко використовуються комбіновані методи створення дискретних захисних структур. Дискретна лазерна обробка поверхні і наступне азотування суттєво підвищує зносостійкість сталей. Встановлено [26], що зносостійкість сталі 40Х з дискретними азотованими шарами в 7–9 разів вища за її зносостійкість в азотованому стані без лазерної обробки. Крім того, лазерною обробкою усувається висока хрупкість покриттів, підвищується адгезія покриття до основи [27]. Регулювання зносостійкості плазмових покриттів шляхом дискретного оплавлення її лазером приблизно 15 % поверхні у вигляді смуг постійної ширини 2,5 мм дозволило підвищити їх зносостійкість у 6 разів. Це можна пояснити зниженням їх напружено-деформованого стану, більш рівномірним перерозподілом навантажень на поверхні тертя в процесі зношування за рахунок локальних мікроруйнувань крихких структурних складових і відносно невисокого когезійного зв'язку між ними в не оплавлених ділянках [28].

Висновки. Таким чином, можна сказати, що фундаментальні дослідження в області різноманітних форм і фігур текстурування поверхні для покращення триботехнічних властивостей набувають все більшого поширення і проводяться вченими як у нашій країні, так і за кордоном. При цьому використовуються різні методи текстурування, включаючи механічну обробку, текстурування пучком іонів, технологія травлення і лазерне текстурування та ін.

Незважаючи на велику кількість публікацій, механізм явищ, що відбуваються з регулярним мікрорельєфом, сьогодні вивчений недостатньо. Відсутні дані, що дозволяють конструювати таку поверхню з максимальним вирашем за експлуатаційними властивостями. Як правило, оптимізація параметрів текстурування здійснюється за допомогою методу проб і помилок. У сфері дискретних поверхонь, для вирішення практичних задач і передачі технологій з лабораторій у промисловість існує потреба у чітких стандартах. Необхідно також вдосконалення існуючих та розробка нових методик точного прогнозування довгострокової поведінки поверхонь при експлуатації за результатами короткострокових лабораторних випробувань.

Список літератури

1. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов : Монография. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. New surface engineering techniques can make metals and plastics more resistant to heat and corrosion. Chem. Eng. 1994. April. 35.
3. Поверхностная прочность материалов при трении [Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К., Бершадский Л.И., Костецкая Н.Б., Ляшко В.А., Сагач М.Ф.] /Под общ. ред. Костецкого Б.И. – «Техніка», 1976. – 296 с.

4. Ляшенко Б. А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б. А.Ляшенко, А. Я.Мовшович, А. И. Долматов // Технологические системы. – 2001. – №4. – С. 17–25.
5. Schneider Y. G. Formation of Surfaces with Uniform Micropatterns on Precision Machine and Instrument Parts / Y. G. Schneider // *Precis. Eng.* – 1984. – 6. – P. 219–225.
6. Bulatov V. P. Basics of Machining Methods to Yield Wear and Fretting Resistive Surfaces, Having Regular Roughness Patterns / V. P.Bulatov, V. A.Krasny, Y. G. Schneider // *Wear.* – 1997. – 208. – P. 132–137.
7. Пат. 13762 Україна, МПК (06) F01L 1/20, F01L 1/46. Пристрій для утворення на плоскій поверхні тертя рельєфу заглибин, що утримують мастильні матеріали / Марчук В. С., Шульга І. Ф., Шульга О. І., Плюсін О. С.; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. – № u200509981; заявл. 24.10.2005; опубл. 17.04.2006, Бюл. №4.
8. Пат. 44643 Україна, F01L 1/20 C23C 8/02. Спосіб отримання рельєфних зносостійких азотованих шарів сталених деталей / Марчук В. С., Шульга І. Ф., Ляшенко Б.А., Цибаньов Г.В., Рутковський А.В., Калініченко В.В.; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – № u200904236; заявл. 29.04.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. №19.
9. Hamilton D. B. A Theory of Lubrication by Microasperities / D. B.Hamilton, J. A. Walowit, C. M. Allen // *ASME J. Basic Eng.* – 1966. 88 (1). – P. 177–185.
10. Saka A. The Role of Tribology in Electrical Contact Phenomena / A. Saka, M. J.Lio, N. P. Suh // *Wear.* – 1984. 100. – P. 77–105.
11. Wang X., Kato K. Improving The anti-seizure ability of SiC seal in water with RIE texturing/ X.Wang, K.Kato // *Tribology Letters.* – 2003. – N14. – P. 275–280.
12. Венцель С. В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания / С. В. Венцель– М. : Химия, 1979. – 240 с.
13. Etsion I. State of the art in laser surface texturing // 7th Biennial conference on Engineering systems design and analysis. July 19–22, 2004, Manchester, United Kingdom, P. 1–9.
14. Geiger M. Influence of Laser-Produced Microstructures on the Tribological Behavior of Ceramics / M.Geiger, S.Roth, W.Becker // *Surf. Coat. Technol.* – 1998. 100–101. – P. 17–22.
15. The Effect of Laser Texturing of SiC Surface on the Critical Load for the Transition of Water Lubrication Mode from Hydrodynamic to Mixed / [X.Wang, K.Kato, K.Adachi, K.Aizawa] // *Tribol. Int.* – 2001. 34 (10). – P. 703–711.
16. Etsion I. A Model for Mechanical Seals with Regular Microsurface Structure / I.Etsion, L.Burstein // *Tribol. Trans.* – 1996. 39 (3). – P. 677–683.
17. Etsion I. Increasing Mechanical Seal Life with Laser-Textured Seal Faces / I.Etsion, G.Halperin, Y.Greenberg: 15th International Conference On Fluid Sealing BHR Group, Maastricht. – 1997. – P. 3–11.
18. Etsion I. Analytical and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal Faces / I.Etsion, Y.Kligerman, G.Halperin // *Tribol. Trans.* – 1999. 42. – P. 511–516.
19. Etsion I. Improving Tribological Performance of Mechanical Seals by Laser Surface Texturing / I.Etsion // *Proceedings of the 17th International Pump Users Symposium.* – 2000. – P. 17–22.
20. Кузьменко А. Г. Дослідження ефективності профілю змашувальної канавки / А. Г.Кузьменко, О. П.Бабак, О. А. Пасічник // *Проблеми трибології.* – 2007. – №3. – С. 3–5.
21. Упрочнение поверхности металлов покрытиями дискретной структуры с повышенной адгезионной и когезионной прочностью / [Ляшенко Б. А., Кузема Ю. А., Дигам М. С., Цыгулев О. В.]. – К. : Ин-т проблем прочности АН УССР, 1984. – 57 с. – (Препринт / АН УССР, Ин-т проблем прочности).
22. Восстановление деталей машин дифференциальными покрытиями дискретной структуры / [Ляшенко Б. А., Розенберг О. А., Ермолаев В. В., Мирненко В. И.] // *Тяжелое машиностроение.* – 2001. – №2. – С. 21–23.
23. Дискретні покриття на різальному інструменті / [Антонюк В. С., Сорока О. Б., Ляшенко Б. А., Рутковський А. В.] // *Проблеми прочности.* – 2007. – №1. – С. 138–143.
24. Марчук В. С. Відновлення зношених деталей авіаційної техніки захисними покриттями / В. С. Марчук // *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* – К.: НАУ, 2006. – Вип. 45. – С. 141–150.

25. Износостойкость керамических режущих инструментов на основе нитрида кремния со сплошными и дискретными нитрид титановыми покрытиями / [Гнесин Г. Г., Ляшенко Б. А., Фоменко С. Н., Рутковский А. В.] // Порошковая металлургия. – 1997. – №11–12. – С. 93–97.

26. Поверхневе зміцнення сталей нанесенням дискретних азотованих шарів / [Кіндрачук М. В., Яхья М. С., Герасимова О. В., Ішук Н. В.] // Технологічні системи. – 2007. – №2. – С. 55–58.

27. Семенов Я. С. Технология повышения износостойкости материалов, подверженных сколу при трении / Я. С. Семенов, М. П. Лебедев // Трение и износ. – 2006 (27). – №3. – С. 309–312.

28. Кіндрачук М. В. Триботехнічні властивості плазмових покриттів з дискретною структурою / М. В. Кіндрачук, Н. В. Ішук, В. В. Пастернак // Проблеми трибології. – 2003. – №1. – С. 75–81.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2013

V. E. MARCHUK, B. A. LJASHENKO, M. V. KINDRACHUK, O. I. DUSCHOTA

FRICION SURFACES PROTECTION BY DISCRETE TEXTURING OF SURFACES

The innovative nature of the methods discrete surfaces by deformation, modification, printing films, coatings, protective layers of different methods and their combinations for improving tribotechnical properties of machine parts and mechanisms have been described. The problems and prospects of technologies for discrete surfaces have been shown in the article.

Keywords: discrete surface laser texturing of surfaces, discrete structure, holes, tribotechnical properties.

Марчук Владимир Ефремович – к. т. н., доцент, доцент кафедри логістики Національного авіаційного університету, sunduk_2005@ukr.net.

Ляшенко Борис Артемович – д. т. н., професор, завідувач відділом Інституту проблем міцності НАН України

Кіндрачук Мирослав Васильович – д. т. н., професор, завідувач кафедри машинознавства Національного авіаційного університету.

Духота Олександр Іванович – к. т. н., старший науковий співробітник, доцент кафедри технологій виробництва та відновлення авіаційної техніки Національного авіаційного університету.