

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВСТІ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ТИТАНУ ПІД ЧАС ДВОСТАДІЙНОГО ОБРОБЛЕННЯ МЕТОДАМИ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ТА ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ТЕКСТУРУВАННЯ

С. С. Добротворський^{1,2*}, Є. В. Басова¹, Б. О. Алексенко¹, Д. В. Трубін¹,
П. Завадзький³, М. Кошцінський^{2,4}

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;
61002, Україна, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

² Познанський університет природничих наук;
60-637, Польща, м. Познань, вул. Войська Польського, 28

³ Познанська політехніка;
60-965, Польща, м. Познань, площа Марії Склодовської-Кюрі, 5

⁴ Університет Адама Міцкевича; 61-712, Польща, м. Познань, вул. Венявського, 1;
e-mail: Sergiy.Dobrotvorskyu@khp.edu.ua

Титан та його сплави широко використовуються в сучасних технологіях завдяки їхнім унікальним фізико-механічним властивостям, таким як висока міцність, корозійна стійкість і біосумісність. В цьому випадку на перший план виходить проблема гідрофобності і гідрофільності оброблених поверхонь. У роботі проаналізовано технологічну спадковість і адсорбційні якості поверхонь титану після торцевого фрезерування та фемтосекундного лазерного оброблення. Досліджено зміну гідрофобних властивостей титанових поверхонь після фрезерування та подальшого фемтосекундного лазерного опромінення. Показано, що топографія поверхні після фрезерування може впливати на формування лазерно-індукованих періодичних структур на поверхні (LIPSS). Визначено, що для мінімізації впливу технологічної спадковості необхідно забезпечити достатню глибину лазерної абляції, що перевищує висоту мікронерівностей після фрезерування. Експериментально встановлено, що поверхня титану після вальцювання має середній кут змочування близько 81,65°, тоді як після фрезерування цей показник знижується до 66,35°. Проведений аналіз впливу лазерного опромінення різної інтенсивності на зміну гідрофобності поверхні титану. Виявлено, що при низькій інтенсивності лазерного впливу (2 мкДж) формування LIPSS структур не повністю усуває сліди механічної обробки, що підтверджує збереження технологічної спадковості. Зі збільшенням енергії імпульсів до 3,5 мкДж та більше поверхня стає більш однорідною, а вплив фрезерування на гідрофобні властивості поступово нівелюється. Визначено, що очищення поверхні титану спиртом тимчасово знижує гідрофобність, що вказує на присутність адсорбованих домішок, які можуть впливати на змочуваність. Розглянуто залежність між топографією поверхні після фрезерування, енергією лазерного опромінення та контактними кутами змочування. Отримані результати демонструють, що комбінація механічного фрезерування та фемтосекундного лазерного опромінення, тобто двостадійна технологія оброблення, дозволяє регулювати поверхневі властивості титану, зокрема його гідрофільність або гідрофобність. Це може бути використано в практичних застосуваннях, де контроль змочуваності титанових поверхонь є критично важливим, наприклад, у біомедичних імплантатах, аерокосмічній та електронній промисловості.

Ключові слова: технологічний процес, титан, технологічна спадковість, фрезерування, лазерне оброблення, LIPSS, гідрофобність, контактний кут, змочуваність, мікротвердість, тертя, зношування, мікроструктура.

Titanium and its alloys are widely used in modern technologies due to their unique physical and mechanical properties, such as high strength, corrosion resistance, and biocompatibility. In this context, the hydrophobicity and hydrophilicity of treated surfaces take precedence. This study analyzes titanium surfaces' technological inheritance and adsorption properties after end milling and femtosecond laser processing. The change in hydrophobic properties of titanium surfaces after milling and subsequent femtosecond laser irradiation is investigated. It is demonstrated that the surface topography after milling can influence the formation of laser-induced periodic surface structures (LIPSS). It is determined that to minimize the impact of technological inheritance, sufficient depth of laser ablation

is required, exceeding the height of micro-roughnesses after milling. Experimental results show that the surface of titanium after rolling has an average contact angle of approximately 81.65° , while after milling, this value decreases to 66.35° . An analysis is conducted on the effect of laser irradiation at different intensities on the hydrophobicity of titanium surfaces. It is found that at low laser intensities ($2 \mu\text{J}$), the formation of LIPSS structures does not completely eliminate the traces of mechanical processing, indicating the preservation of technological inheritance. As the pulse energy increases to $3.5 \mu\text{J}$ and above, the surface becomes more uniform, and the effect of milling on hydrophobic properties gradually diminishes. It is established that cleaning the titanium surface with alcohol temporarily reduces its hydrophobicity, suggesting the presence of adsorbed impurities that may influence wettability. The relationship between the surface topography after milling, laser irradiation energy, and contact angles of wettability is discussed. The results demonstrate that a combination of mechanical milling and femto-second laser irradiation, i.e., a two-stage processing technique, allows for the regulation of titanium surface properties, particularly its hydrophilicity or hydrophobicity. This can be applied in practical uses where controlling the wettability of titanium surfaces is critical, such as in biomedical implants, aerospace, and electronics industries.

Keywords: technological process, titanium, technological inheritance, milling, laser processing, LIPSS, hydrophobicity, contact angle, wettability, microhardness, friction, wear, microstructures.

Вступ

Титан та його сплави широко використовуються в сучасних технологіях завдяки їхнім унікальним фізико-механічним властивостям, таким як висока міцність, корозійна стійкість і біосумісність. Зокрема, у біомедичній галузі, аерокосмічній промисловості та електроніці важливе значення має керування поверхневими характеристиками титану, зокрема його змочуваністю [1]. Контроль гідрофільності або гідрофобності титанових поверхонь є ключовим фактором для оптимізації їхньої функціональності, наприклад, у підвищенні остеоінтеграції імплантатів або покращенні адгезії покриттів у технологічних процесах [2].

Відомо, що змочуваність поверхні значною мірою визначається її мікро- та нанотопографією, яка формується під час механічної або лазерної обробки. Одним із критичних аспектів є так звана технологічна спадковість – вплив попередніх стадій оброблення на кінцеві властивості поверхні. Дослідження показують, що сліди механічного фрезерування можуть залишатися навіть після лазерної обробки, що впливає на зміну контактного кута змочування [3]. У зв'язку з цим комбіновані методи, такі як поєднання фрезерування та фемтосекундного лазерного оброблення, є перспективними для створення функціональних поверхонь із контрольованими змочувальними характеристиками [4].

Фемтосекундне лазерне опромінення дозволяє модифікувати поверхню титану шляхом формування лазерно-індукованих періодичних структур LIPSS (laser-induced periodic surface structures). Такі нанорельєфні утворення змінюють змочуваність матеріалу завдяки ефектам, аналогічним до тих, що спостерігаються в природних супергідрофобних поверхнях, таких як листя лотоса [5]. Проте механізми впливу попередньої механічної обробки на ефектив-

ність лазерної модифікації поверхні залишаються недостатньо дослідженими.

Таким чином, метою даної роботи є дослідження впливу технологічної спадковості на змочуваність титану після фрезерування та подальшого фемтосекундного лазерного оброблення. Основний акцент зроблено на визначенні взаємозв'язку між параметрами лазерної модифікації, залишковими слідами механічної обробки та контактними кутами змочування.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

У сучасному машинобудуванні зростає роль лазерного оброблення, зокрема для створення мікро- та наноструктур на поверхні металів. Надшвидкі лазерні імпульси є перспективним методом отримання таких структур, що дозволяє покращити трибологічні властивості поверхонь, зменшити коефіцієнт тертя та забезпечити контрольовану змочуваність матеріалів [6, 7]. Водночас якість поверхні, отриманої після механічної обробки, значною мірою впливає на ефективність подальшого лазерного текстуровання. Технологічна спадковість шорсткості – це явище, за якого параметри поверхні, сформовані на попередньому етапі обробки, впливають на результати наступних технологічних операцій [8].

Зокрема, у процесі торцевого фрезерування титану початкові характеристики шорсткості можуть визначати рівномірність поглинання лазерної енергії та стабільність утворення лазерно-індукованих періодичних структур (LIPSS) [9]. Оптимізація параметрів фрезерування дозволяє зменшити початкову шорсткість, що позитивно впливає на подальше лазерне текстуровання [10].

Різні дослідження підтверджують, що геометрія різального інструменту та режими різання суттєво впливають на формування шорс-

ткості після фрезерування [11]. Основні фактори, що визначають якість обробленої поверхні: радіус заокруглення різальної кромки, подача на зуб, глибина різання та швидкість різання. Зокрема, збільшення радіуса заокруглення різальної кромки сприяє зменшенню висоти мікронерівностей, оскільки забезпечує більш плавний контакт між інструментом і матеріалом [12]. Подача на зуб є найсуттєвішим фактором, що впливає на шорсткість: її збільшення призводить до утворення глибших слідів інструмента та збільшення висоти мікронерівностей [13]. Глибина різання взаємодіє з радіусом різальної кромки: при глибині різання 0,75 мм значення шорсткості R_a значно вищі, ніж при 0,5 мм або 1 мм, що пояснюється складними ефектами взаємодії різця з матеріалом [14]. Швидкість різання може впливати на налипання матеріалу на інструмент, що змінює якість поверхні. Результати дослідження процесу безмастильного фрезерування показали, що варіації швидкості різання та подачі можуть істотно впливати на адгезію матеріалу до різальної кромки інструменту [15].

Технологічна спадковість шорсткості має вирішальне значення для ефективності лазерної обробки. Поверхневі нерівності, сформовані під час фрезерування, можуть змінювати розподіл поглинання лазерної енергії, що впливає на стабільність формування LIPSS [16]. Зокрема, під час лазерного текстуровання титанових деталей попередня механічна обробка визначає однорідність утворення LIPSS – великі мікронерівності можуть викликати нерівномірне утворення структур [17]. Крім того, вона впливає на коефіцієнт тертя: зменшення шорсткості після фрезерування дозволяє краще контролювати трибологічні характеристики поверхні після лазерного текстуровання [18]. Також зглажені поверхні потребують меншої лазерної потужності для формування стабільних LIPSS, що покращує енергетичну ефективність процесу [19].

Результати дослідження підтверджують, що правильний вибір параметрів фрезерування може суттєво покращити якість поверхні перед лазерною обробкою, що знижує потребу в додаткових операціях, таких як шліфування. Зокрема, використання різальних пластин із спеціальною геометрією, наприклад, вірег-вставок, може значно зменшити шорсткість і знизити викиди CO_2 до 75 % [20]. Системи мінімального мащення (MQL) нанорідинами дозволяють покращити якість обробки та зменшити енергоспоживання [21]. Крім того, адаптивне керування ЧПУ може коригувати параметри оброб-

ки в реальному часі, компенсуючи зміни в подачі та зменшуючи ризик дефектів [15].

Таким чином, технологічна спадковість шорсткості відіграє ключову роль у комбінованих процесах механічної та лазерної обробки. Оптимізація параметрів торцевого фрезерування титану дозволяє досягти меншої початкової шорсткості, що позитивно впливає на ефективність лазерного текстуровання. Подальші дослідження мають бути зосереджені на чисельному моделюванні впливу різних параметрів фрезерування на якість лазерної текстурованої поверхні [10], експериментальному вивченні впливу початкової шорсткості на формування LIPSS [22] та розробці інтегрованих алгоритмів адаптивного керування фрезеруванням для покращення якості поверхні перед лазерною обробкою [23]. Оптимізація параметрів фрезерування є ефективним засобом покращення якості лазерної текстурованої поверхні, що відкриває нові можливості для застосування LIPSS у промисловості.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Для успішного формування гідрофобних властивостей на поверхні титану за допомогою фемтосекундного лазерного оброблення необхідно вирішити низку невирішених до цього питань. Одним із ключових аспектів є вивчення впливу параметрів фемтосекундного лазерного опромінення, зокрема потужності, частоти імпульсів і швидкості сканування на утворення мікроструктур на поверхні титанових деталей, що безпосередньо впливає на його гідрофобність.

Хоча фемтосекундні лазери здатні створювати високоорганізовані періодичні структури на поверхні зразків титану, ще залишаються не до кінця вивченими механізми їх утворення при різних параметрах опромінення. Особливо важливим є дослідження процесу формування низькочастотних лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур (LSFL), що виникають на поверхні титану за різної інтенсивності лазерного опромінення. Ці структури можуть значно впливати на гідрофобні властивості матеріалу, зокрема на зміну кута змочування.

Ще одне невирішене питання полягає у впливі попередніх етапів оброблення, таких як фрезерування, на формування LIPSS під час фемтосекундного лазерного оброблення. Існує потреба у з'ясуванні, чи впливає підготовка поверхні перед лазерним обробленням на кінцеві характеристики гідрофобності, зокрема на стабільність отриманих результатів.

Нарешті, важливим аспектом є дослідження взаємодії фемтосекундного лазера з титановими сплавами з урахуванням впливу різних температурних режимів та шорсткості поверхні на утворення гідрофобних властивостей. Це дозволить точніше налаштувати технологію лазерного оброблення і розробити нові методи для досягнення стабільних гідрофобних властивостей на поверхнях титанових виробів.

Таким чином, вирішення цих невирішених питань дозволить оптимізувати процеси лазерного оброблення титанових деталей і значно підвищити ефективність створення матеріалів з бажаними функціональними властивостями, зокрема гідрофобністю та гідрофільністю.

Формулювання цілей

Метою даної роботи є дослідження технологічної спадковості шорсткості поверхні титанових деталей під час двоступеневого оброблення методами торцевого фрезерування та фемтосекундного лазерного текстурування. Основна мета полягає в аналізі впливу попереднього механічного оброблення на утворення лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур (LIPSS) та їх взаємодії з попередньою шорсткістю поверхні.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити вплив торцевого фрезерування на шорсткість поверхні титану, зокрема на формування мікронерівностей, що можуть впливати на подальше лазерне текстурування;
- оцінити зміни шорсткості поверхні титанової деталі після двоетапного оброблення, що складається з фрезерування та фемтосекундного лазерного опромінення;
- визначити технологічну спадковість шорсткості поверхні титану під час комбінованого оброблення, вивчаючи її вплив на утворення низькочастотних та високочастотних LIPSS структур;
- провести аналіз стабільності отриманих структур та їх властивостей (шорсткість, гідрофобність) після двоетапного оброблення;
- визначити умови, за яких технологічна спадковість шорсткості мінімальна, що дозволяє отримати оптимальні лазерні структури для покращення гідрофобних властивостей титану.

Таким чином, дослідження має на меті розкрити взаємодію двох технологічних етапів оброблення титанових деталей та виявити, як попередня механічна обробка впливає на кінцеві характеристики поверхні після фемтосекундного лазерного текстурування.

Висвітлення основного матеріалу дослідження та дискусія

Матеріали і методи дослідження

Як об'єкт дослідження використовували пластини з титанового сплаву марки BT6 (Ti-6Al-4V), основними легувальними елементами якого є титан (Ti) – 86,45–90,9%, алюміній (Al) – 5,3–6,5% та ванадій (V) – 3,5–4,5%. Процес фрезерної обробки здійснювався на п'ятивісному обробному центрі моноблочного типу DMU 50 із застосуванням твердосплавного інструменту HPC Master Titan, призначеного для чистового фрезерування титанових сплавів. Лазерне структурування поверхні проводилося із використанням фемтосекундного лазерного джерела типу JasperXO-20, максимальною потужністю 20 Вт (понад 100 мкДж) та тривалістю імпульсу 270 фс. Морфологічні характеристики поверхні досліджували за допомогою цифрового 3D-мікроскопа Bruker Alicona PortableRL, а параметри гідрофобності визначали методом вимірювання кута змочування із застосуванням контактного гоніометра Phoenix-150 Contact Angle.

Для побудови теоретичної моделі залежності шорсткості поверхні титану від параметрів під час фрезерування кінцевою торцевою фрезою необхідно враховувати широкий спектр факторів. Спрощений функціонал шорсткості можна представити як (1):

$$R_a = f(f_z, r, v_c, H), \quad (1)$$

де R_a — параметр шорсткості поверхні (середня арифметична висота профілю);

f_z — подача на зуб, як основний параметр, що визначає висоту мікронерівностей на обробленій поверхні;

r — радіус заокруглення різальної кромки, що визначає форму і висоту сліду, залишеного зубом фрези;

v_c — швидкість різання, що впливає на теплоутворення, пластичного плину матеріалу та загальну стабільність процесу;

H — твердість матеріалу заготовки, що визначає опір матеріалу процесу різання та його схильність до пластичної деформації. Решта параметрів приймаються постійними та враховуються у коефіцієнті C у розгорнутій формі спрощеного функціонала (2):

$$R_a = C \cdot f_z^{\alpha_1} \cdot r^{\alpha_2} \cdot v_c^{\alpha_3} \cdot H^{\alpha_4}. \quad (2)$$

Взагалі взаємозв'язок шорсткості R_a та висоти гребенів при торцевому фрезеруванні приблизно можна записати як (3):

$$R_a \approx \frac{f_z^2}{8r} \cdot \frac{1}{\sin^2 \kappa_r}, \quad (3)$$

де κ_r – головний кут у плані, що являє собою кут між напрямком подачі фрези та основною різальною кромкою зуба.

Значимо, що при $\kappa_r = 90^\circ$ (класичне торцеве фрезерування): $\sin^2 90^\circ = 1 \Rightarrow R_a = \frac{f_z^2}{8r}$.

Тоді задача оптимізації може бути записана наступним чином (4):

$$\min_{f_z, r, v_c, H} R_a(f_z, r, v_c, H), \quad (4)$$

за умов: $f_z \in [f_{z,\min}, f_{z,\max}]$, $r \in [r_{\min}, r_{\max}]$, $v_c \in [v_{c,\min}, v_{c,\max}]$, $H \in [H_{\min}, H_{\max}]$.

Для зручності аналізу припустимо, що H задано як константа (матеріал фіксовано). Тоді шорсткість може бути визначена за формулою (5):

$$R_a = C' \cdot f_z^{\alpha_1} \cdot r^{\alpha_2} \cdot v_c^{\alpha_3}, \quad (5)$$

де $C' = C \cdot H^{\alpha_4}$.

Застосуємо логарифми для спрощення залежності (6):

$$\ln R_a = \ln C' + \alpha_1 \ln f_z + \alpha_2 \ln r + \alpha_3 \ln v_c. \quad (6)$$

Необхідні умови екстремуму:

$$\frac{\partial R_a}{\partial f_z} = 0, \quad \frac{\partial R_a}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial R_a}{\partial v_c} = 0. \quad (7)$$

Для мінімізації функціоналу шорсткості розглянемо часткові похідні:

- за f_z :

$$\frac{\partial R_a}{\partial f_z} = \alpha_1 C' f_z^{\alpha_1-1} r^{\alpha_2} v_c^{\alpha_3}.$$

Прирівнюємо до нуля:

$$\alpha_1 f_z^{\alpha_1-1} = 0 \Rightarrow f_z = f_{z,\text{опт}}.$$

- за r :

$$\frac{\partial R_a}{\partial r} = \alpha_2 C' f_z^{\alpha_1} r^{\alpha_2-1} v_c^{\alpha_3}.$$

Прирівнюємо до нуля:

$$\alpha_2 r^{\alpha_2-1} = 0 \Rightarrow r = r_{\text{опт}}.$$

- за v_c :

$$\frac{\partial R_a}{\partial v_c} = \alpha_3 C' f_z^{\alpha_1} r^{\alpha_2} v_c^{\alpha_3-1}.$$

Прирівнюємо до нуля:

$$\alpha_3 v_c^{\alpha_3-1} = 0 \Rightarrow v_c = v_{c,\text{опт}}.$$

У підсумку для знаходження оптимальних значень $f_{z,\text{опт}}$, $r_{\text{опт}}$, $v_{c,\text{опт}}$ необхідно використовувати емпіричні дані для коефіцієнтів α_i і встановлені діапазони параметрів. Обмеження (f_z , r , v_c) задають, виходячи з реальних можливостей процесу. Для вирішення задачі оптимізації нами було створено комп'ютерну програму з використанням оптимізації методом градієнтного спуску. Чисельне моделювання процесів та отримання результатів було проведено у середовищі Python 3.13 (рис. 1–3).

У результаті оптимізації отримано залежності зміни параметрів і знайдено оптимальні

параметри: $f_z = 0,0165$, $r = 3.0001$, $v_c = 125.0000$, $R_a = 0.00008$.

Дослідимо оптимізацію шорсткості поверхні в залежності від радіуса округлення зуба фрези.

Виконаємо мінімізацію функціоналу (8):

$$\min_r R_a(r) = k \cdot \frac{f \cdot D}{r} \cdot \frac{1}{\sqrt{v}} + \alpha \cdot r^2, \quad (8)$$

де D – діаметр фрези,

k – коефіцієнт, що залежить від матеріалу, типу обробки та інших факторів,

α – коефіцієнт, що відображає вплив збільшення радіуса на шорсткість (наприклад, через зношеність інструмента або інші фактори).

Метою оптимізаційної моделі є мінімізація шорсткості R_a в залежності від радіуса округлення зуба r , що може бути досягнуто шляхом знаходження оптимального значення r . Модель поєднує два протилежні ефекти: чим менший r , тим вища шорсткість через збільшення напружень і грубості обробки, і навпаки, чим більший r , тим вища шорсткість через погіршення точності обробки (з'являється другий член з r^2). Перед нами стояло завдання – знайти оптимальне значення радіуса $r_{\text{опт}}$, при якому шорсткість R_a мінімальна.

Для досягнення поставленої мети нами було розроблено спеціалізовану програму, що складається з декількох логічно пов'язаних модулів, реалізовану мовою програмування Python. Програма забезпечує обчислення шорсткості поверхні для заданих вхідних технологічних параметрів, а також автоматизований пошук оптимальних значень цих параметрів з метою мінімізації шорсткості. Структурно вона поділена на кілька основних модулів: модуль математичної моделі (розрахунок шорсткості за емпіричною залежністю), модуль градієнтної оптимізації (з використанням функції minimize з бібліотеки SciPy.optimize), модуль перевірки фізичних обмежень параметрів та модуль візуалізації (побудова графіків залежності шорсткості від окремих параметрів за умов фіксованих інших). Оптимізація виконується методами градієнтного спуску та BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno), що є ефективним варіантом градієнтного спуску з квазі-Ньютонівським наближенням. Такий підхід забезпечує високу точність і стабільність пошуку мінімуму навіть у випадках складного профілю функції. Завдяки модульній структурі, програма є зручною для адаптації, розширення функціональності або інтеграції в більш складні системи комп'ютерної підтримки технологічних рішень.

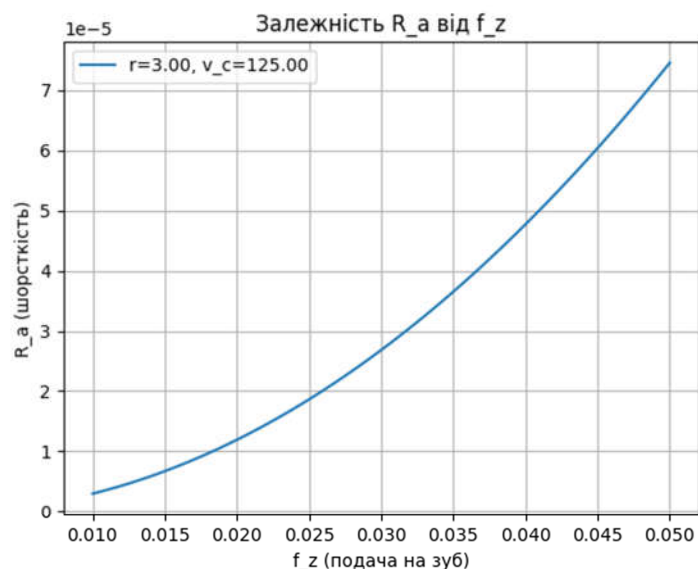


Рисунок 1 – Залежність величини шорсткості (мм) від подачі на зуб (мм)

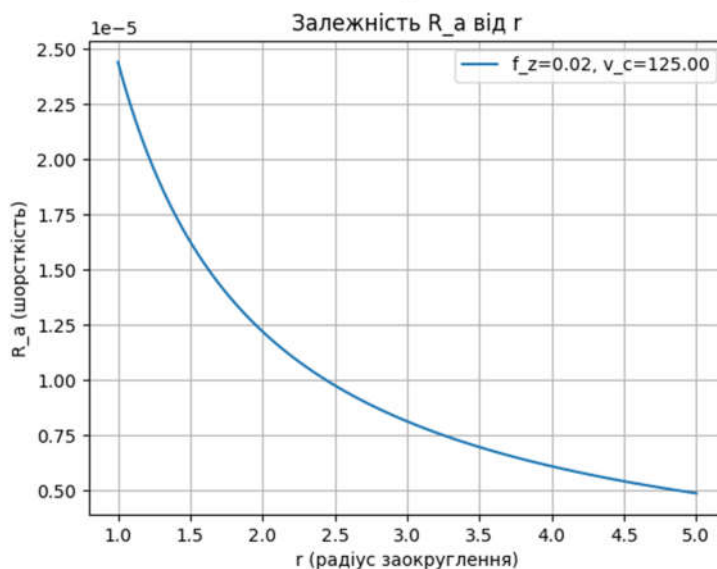


Рисунок 2 – Залежність величини шорсткості (мм) від радіуса заокруглення зуба (мм)

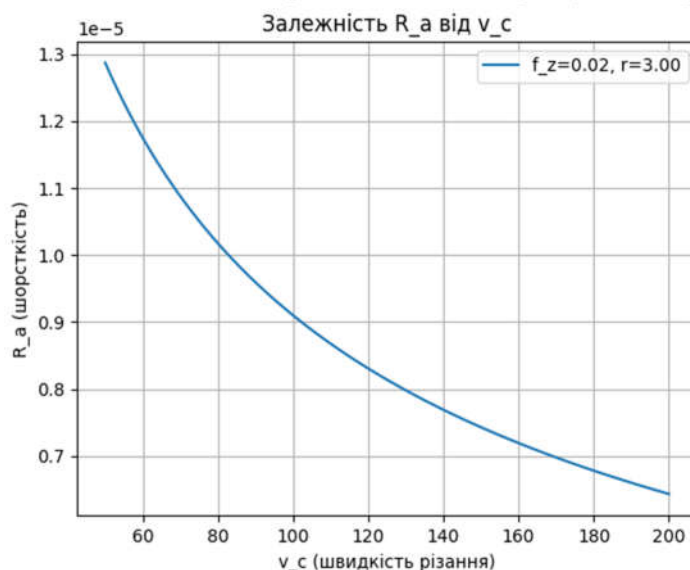


Рисунок 3 – Залежність величини шорсткості (мм) від швидкості різання (м/с)

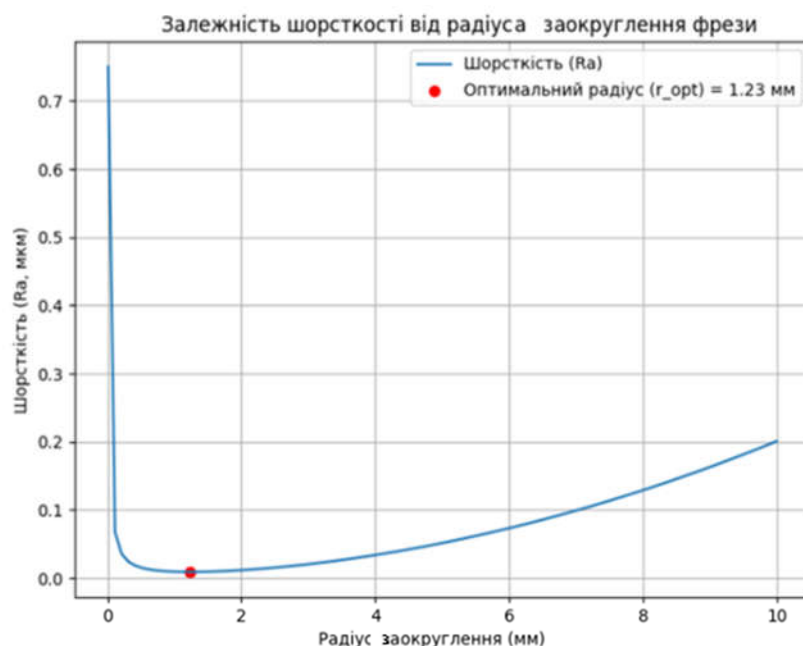


Рисунок 4 – Залежність шорсткості від радіуса заокруглення фрези

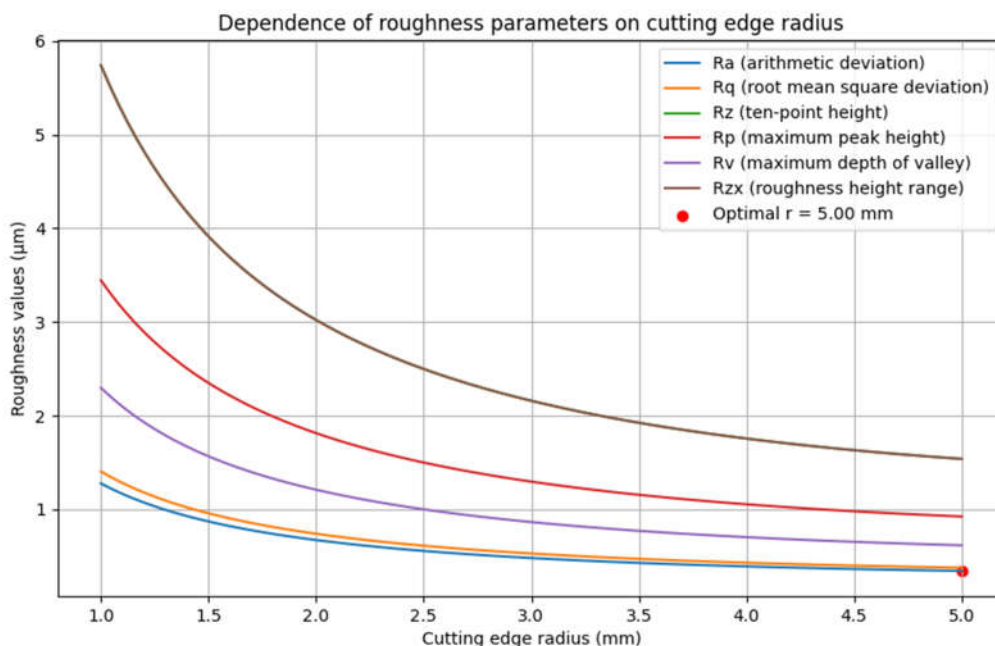


Рисунок 5 – Залежність параметрів шорсткості від радіуса заокруглення різальної кромки

Теоретичне дослідження передбачало введення параметру k ($k = 0.15$), що є емпіричним коефіцієнтом (припускається, для даного матеріалу та умов) $f = 0.05$ подачі на зуб (мм/зуб), $D = 10$ діаметру фрези (мм), $v = 100$, швидкість різання (м/хв), $\alpha = 0.002$ коефіцієнт.

Графік показує залежність шорсткості від радіуса заокруглення фрези, де видно, як шорсткість змінюється залежно від зміни радіуса (рис. 4). Червона точка на графіку вказує на оптимальний радіус, при якому шорсткість мінімальна.

Результати загальної оптимізації комплексу параметрів шорсткості R_a , R_q , R_z , R_p , R_v , R_{zx} наведено на рис. 5.

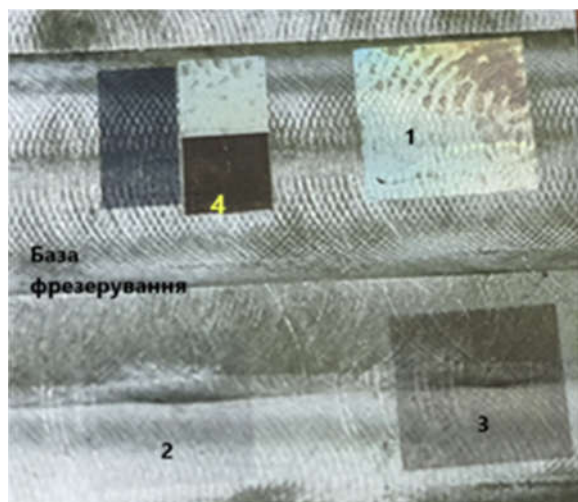
Використовуючи комплексний підхід, який включає різні параметри шорсткості (R_a , R_q , R_z , R_p , R_v , R_{zx}) і враховує як геометричні, так і динамічні ефекти, можна значно точніше передбачити характеристики поверхні, що утворюється під час фрезерування. Такий підхід дозволяє отримати більш детальну і точну модель шорсткості, що враховує не лише форму сліду, але й складні фізичні процеси, що відбуваються під час обробки.

Результати та обговорення

Процес фрезерування є важливим етапом у виготовленні металевих деталей, де утворення шорсткості та зміна топографії поверхні можуть значно вплинути на подальшу обробку. Зокрема, для створення структур типу LIPSS за допомогою лазерного оброблення, питання технологічної спадковості стає надзвичайно актуальним. Технологічна спадковість передбачає, що сліди попереднього оброблення можуть впливати на формування LIPSS структур, тому необхідно забезпечити, щоб глибина лазерної абляції була достатньою для перекриття мікронерівностей, що утворилися після фрезерування. Таким чином, для ефективного формування LIPSS важливо, щоб глибина лазерного оброблення ($d_{\text{абл}}$) була більшою або рівною висоті нерівностей після фрезерування ($h_{\text{фрез}}$), а також щоб амплітуда LIPSS (A_{LIPSS}) була значно більшою, ніж залишкові нерівності після лазерної обробки, що виражається умовою:

$$A_{\text{LIPSS}} \gg h_{\text{фрез}} - d_{\text{абл}} \quad (9)$$

В експериментальних дослідженнях було використано зразки титану, поверхні яких спочатку піддавались фрезеруванню з використанням торцевої фрези, а потім оброблялись фемтосекундним лазером (рис. 6). Основною метою дослідження було оцінити вплив шорсткості поверхні, зумовленої фрезеруванням, на гідрофобність титанової поверхні після лазерного оброблення.



1, 2, 3, 4 – поверхні після оброблення і базова поверхня після фрезерування

Рисунок 6 – Зразок титану після фрезерування та лазерного оброблення фемтосекундним лазером

Дослідження з використанням цифрового оптичного мікроскопа Bruker Alicona Portable RL, представлені на рис. 7 – 9 (при кратності

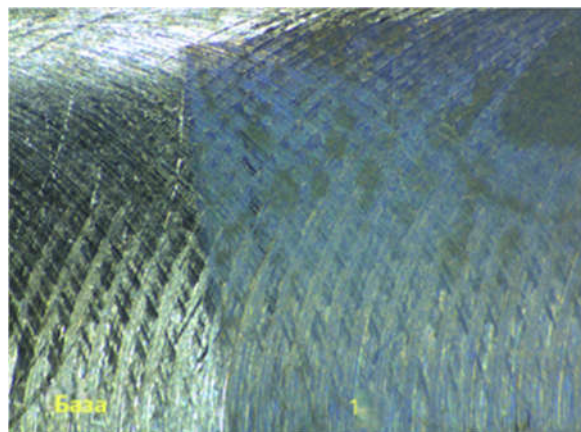


Рисунок 7 – Цифрова оптична мікроскопія зразка титану після фрезерування та лазерного оброблення фемтосекундним лазером: базова поверхня та позиція 1 з LIPSS структурами. Енергія імпульсів – 2 uJ (при кратності збільшення x20)

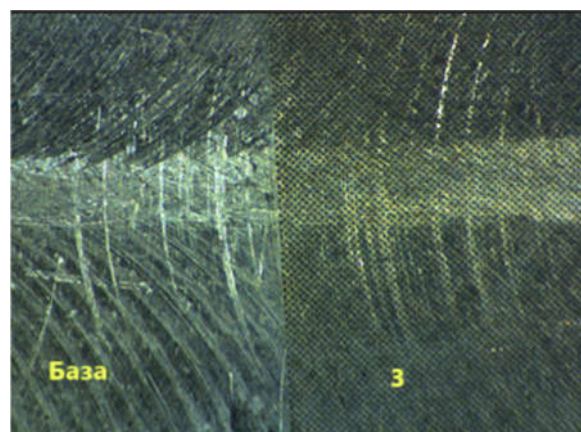


Рисунок 8 – Цифрова оптична мікроскопія зразка титану після фрезерування та лазерного оброблення фемтосекундним лазером: базова поверхня та позиція 3. Енергія імпульсів – 3.5 uJ у місцях чорних періодичних точок поверхні 3 (при кратності збільшення x20)

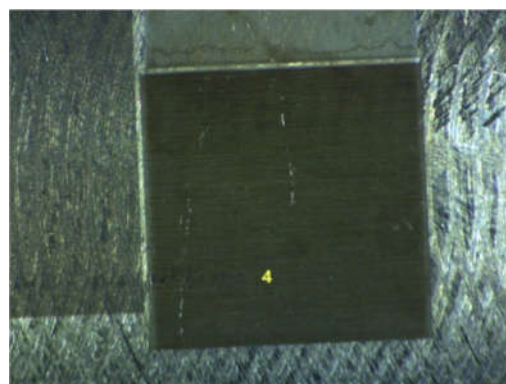
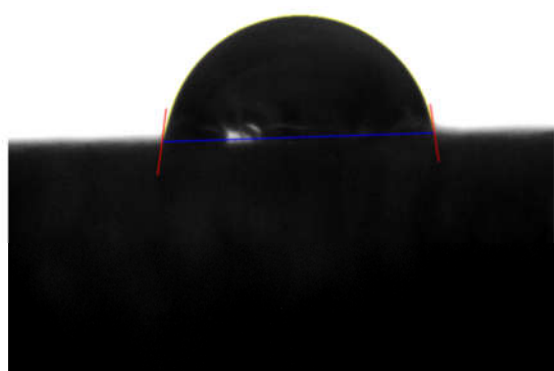
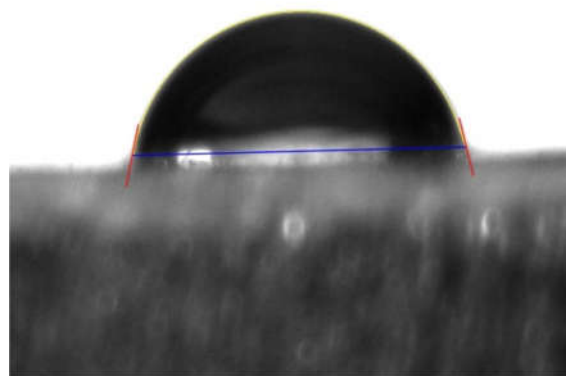


Рисунок 9 – Цифрова оптична мікроскопія зразка титану після фрезерування та лазерного оброблення фемтосекундним лазером: базова поверхня та позиція 4. Енергія імпульсів – 9 uJ. (при кратності збільшення x20)



Кут контакту (середній) [градус]	81,65147
Лівий кут [градус]	80,40752
Правий кут [градус]	82,89544
Висота від верху до основи [мм]	0,97427
Довжина базової лінії [мм]	2,28635
Площа основи [мм ²]	4,1056
Об'єм краплі [μL]	2,37157
Енергія змочування [мН/м]	10,45398
Коефіцієнт розтікання [мН/м]	61,54602
Робота адгезії [мН/м]	82,45399

а



Кут контакту (середній) [градус]	66,35274
Лівий кут [градус]	66,48547
Правий кут [градус]	66,22001
Висота від верху до основи [мм]	0,81869
Довжина базової лінії [мм]	2,49414
Площа основи [мм ²]	4,88574
Об'єм краплі [μL]	2,16311
Енергія змочування [мН/м]	28,87954
Коефіцієнт розтікання [мН/м]	43,12046
Робота адгезії [мН/м]	100,87955

б

а – поверхня титанової пластини у необробленому стані після вальцювання (пластична деформація), б – поверхня титанової пластини у обробленому стані фрезеруванням (Рис. 7, Рис. 8)

Рисунок 10 – Фотографія крапель води і параметри гідрофобності

збільшення $\times 20$), дозволили отримати детальні зображення поверхні титану після фрезерування та лазерного оброблення. Візуальні результати показують, що при лазерному опроміненні формуються характерні періодичні структури, які змінюються залежно від енергії лазерного імпульсу. Це дозволяє нам корелювати параметри гідрофобності з типом сформованих структур на поверхні металу.

Для оцінки гідрофобності оброблених поверхонь було проведено вимірювання кута змочування із застосуванням контактного гоніометра **Phoenix 150 Contact Angle**. Під час досліджень використовувалися **калібровані краплі**, які автоматично формуються вимірювальною системою приладу; об'єм кожної краплі становив **5 мкл**, що забезпечує стабільність умов вимірювання та відтворюваність результатів. Результати показують, що після фрезерування поверхня титану демонструє зниження гідрофобності (середній контактний кут становить 66.35°) порівняно з необробленою поверхнею (81.65°) (рис. 10). Варіація контактних кутів на різних ділянках фрезерованої поверхні може бути пояснена нерівномірною топографією, створеною в процесі фрезерування.

На основі результатів гідрофобності після лазерного оброблення, можна зробити висновок, що зростання інтенсивності лазерного

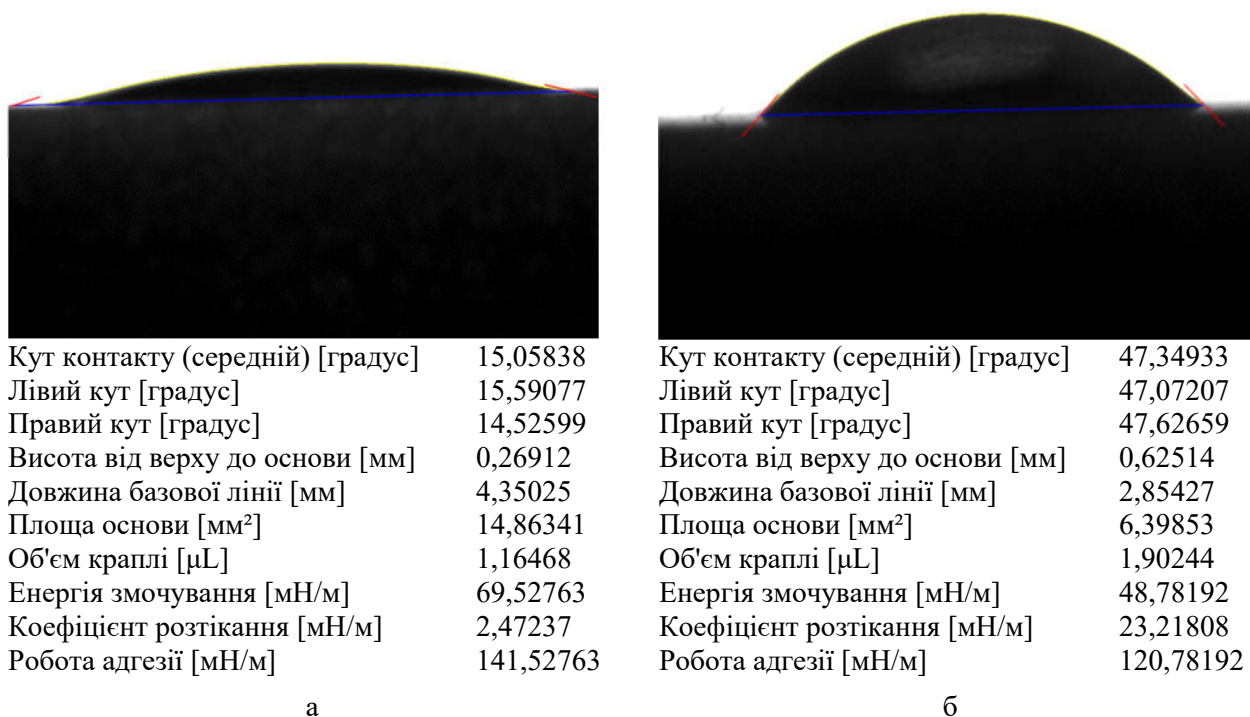
опромінення впливає на гідрофільність поверхні, зменшуючи контактний кут змочування (рис. 11). Промивання у спирті забезпечує збільшення кута, але поверхня все одно залишається гідрофільною. Так, при обробленні лазером з енергією $3.5 \mu\text{J}$, структура поверхні переходить у стабільний стан, де гідрофобність поступово зростає до рівня від 60 до 70° , що підтверджує вплив лазерного оброблення на зміну адсорбційних властивостей металу.

Таким чином, комбінування фрезерування з лазерним обробленням дозволяє ефективно контролювати гідрофобність поверхні титану, а також покращувати характеристики змочуваності та адсорбційні властивості, які можна оптимізувати за допомогою налаштування параметрів лазерного опромінення та фрезерування.

Висновки

В результаті проведених досліджень:

- встановлено вплив технологічної спадковості шорсткості поверхні титану після торцевого фрезерування на ефективність подальшого фемтосекундного лазерного текстурування. Показано, що попередня механічна обробка суттєво впливає на утворення лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур (LIPSS), а також на стабільність отриманих характеристик змочуваності;



а – поверхня 1 (Рис. 6, Рис. 7) у стані після перебування довгий час в оточуючому середовищі;
б – після промивки у спирті і сушіння за кімнатної температури 30 хвилин

Рисунок 11 – Фотографія крапель води і параметри гідрофобності

- проведено чисельне моделювання впливу основних параметрів фрезерування (подачі на зуб, радіуса заокруглення різальної кромки та швидкості різання) на шорсткість поверхні титану. Оптимізація цих параметрів дозволила мінімізувати початкову шорсткість, що сприяє більш рівномірному формуванню LIPSS при лазерному обробленні;

- визначено, що зменшення початкової шорсткості титанової поверхні перед лазерною обробкою дозволяє підвищити ефективність процесу текстурування, забезпечуючи більш стабільні гідрофобні властивості. Встановлено, що найкращі результати досягаються при оптимальному співвідношенні параметрів фрезерування та режимів лазерного опромінення;

- виявлено, що використання оптимальних режимів механічної обробки перед лазерним текстуруванням дозволяє знизити необхідну потужність лазера для утворення LIPSS, що покращує енергетичну ефективність процесу та підвищує точність отриманих структур;

- запропоновано рекомендації щодо вибору параметрів механічного фрезерування для підготовки титанових поверхонь до лазерного текстурування, що відкриває нові можливості для керованого створення поверхонь із заданими змочувальними характеристиками.

Впровадження отриманих результатів у виробничі процеси дозволить покращити якість лазерно-структурованих поверхонь титану, що є перспективним для біомедичних, аерокосмічних та інших високотехнологічних застосувань.

Фінансування: дослідження виконано в рамках дослідницького проєкту «Формування та трансформація періодичних наноглицевмісних структур на металевих поверхнях за допомогою методів лазерного, мікрохвильового та плазмового впливу» (державний реєстраційний номер 0124U000481). Автори також висловлюють подяку за наукову допомогу компанії FLUENCE, представленій доктором Богуславом Штепаком і пані Наталією Грудзен.

Література / References

1. Banerjee S., Mukherjee P. *Titanium: Processing, Applications, and Properties*. Cambridge University Press, 2020
2. Long M., Rack H. J. Titanium alloys in total joint replacement – A materials science perspective. *Biomaterials*. 1998. Vol. 19, No 18. P. 1621–1639. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(98\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(98)00034-0)

3. Vorobyev A., Guo C. Direct femtosecond laser surface structuring of metals. *Optics Express*. 2005. Vol. 14, No. 6. P. 2164–2169. <https://doi.org/10.1364/OPEX.14.002164>
4. Liu Y., Rajput S., et al. Hydrophobicity control of titanium surfaces using femtosecond laser pulses. *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 435. P. 852–859. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.007>
5. Jiang L., Zhao Y., Zhai J. A lotus-leaf-like superhydrophobic surface: A porous micro-/nanofiber composite film prepared by electrohydrodynamics. *Angewandte Chemie International Edition*. 2004. Vol. 43, No. 33. P. 4338–4341. <https://doi.org/10.1002/anie.200460541>
6. Lin X., Liang C., Li Y., Geng Y., Chen Z., Zhao Y., Chen X., Wu J., Wu S. Review: Laser shock processing technique on the additive manufactured metallic alloys. *Journal of Laser Applications*. 2024. Vol. 36, No. 3. <https://doi.org/10.2351/7.0001411>
7. Demir A. G., Fortunato A., Zaeh M. F. Editorial. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. 2024. Vol. 11, No. 1. P. 1–2. <https://doi.org/10.1007/s40516-024-00249-6>
8. Wang X., Huang Y., Li C., Xu B. Numerical simulation and experimental study on picosecond laser ablation of stainless steel. *Optics & Laser Technology*. 2020. Vol. 127. art. no. 106150. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106150>
9. Wang Y., Li H. Effect of Initial Surface Roughness on Laser-Induced Periodic Surface Structures Formation. *Optics and Lasers in Engineering*. 2023. Vol. 162. P. 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107115>
10. Savriama G. TUTORIAL: Two Temperature Model for Ultrashort Pulse Laser with COMSOL Multiphysics. 2021, July 9. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24211.81449>
11. Smith J.D., Brown A.L. Influence of Cutting Tool Geometry on Surface Roughness in Milling Processes. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021. Vol. 115, No. 3. P. 789–802.
12. Miller R.T., Johnson P.R. Optimization of Cutting Parameters to Minimize Surface Roughness in End Milling. *J. Manuf. Process*. 2020. Vol. 58. P. 615–623.
13. Bembenek M., Dzienniak D., Dzindziora A., Sułowski M., Ropyak L. Investigation of the Impact of Face Milling Parameters on the Roughness of the Machined Surface for 1.4301 Steel. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 2023. Vol. 17, No. 4. P. 299–312. <https://doi.org/10.12913/22998624/170422>
14. Davis L.E., Thompson S.M. The Impact of Vibrations on Surface Integrity during Milling Operations. *Precis. Eng.* 2022. Vol. 72. P. 456–467.
15. Kombarov V., Sorokin V., Tsegelnyk Y., Plankovskyy S., Aksonov Y., Fojtů O. Numerical Control of Machining Parts from Aluminum Alloys with Sticking Minimization. *Int. J. Mechatron. Appl. Mech.* 2021. Vol. 1, No. 9. P. 209–216. <https://doi.org/10.17683/IJOMAM/ISSUE9.30>
16. Wang X., Huang Y., Li C., Xu B. Numerical Simulation and Experimental Study on Picosecond Laser Ablation of Stainless Steel. *Optics & Laser Technology*. 2020. Vol. 127. art. no. 106150. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106150>
17. Wang Y., Li H. Effect of Initial Surface Roughness on Laser-Induced Periodic Surface Structures Formation. *Opt. Lasers Eng.* 2023. Vol. 162. P. 107–115.
18. Bonse J., Koter R., Hartelt M., Spaltmann D., Pentzien S., Höhm S., Rosenfeld A.B., Krüger J.K. Femtosecond Laser-Induced Periodic Surface Structures on Steel and Titanium Alloy for Tribological Applications. 2014. Vol. 117, No. 1. P. 103–110. <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8229-2>
19. Miyagawa R., Kamibayashi D., Nakamura H., Hashida M., Zen H., Somekawa T., Matsuoka T., Ogura H., Sagae D., Seto Y., Shobu T., Tominaga A., Eryu O., Ozaki N. Crystallinity in Periodic Nanostructure Surface on Si Substrates Induced by Near- and Mid-Infrared Femtosecond Laser Irradiation. *Sci. Rep.* 2022. Vol. 12, No. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25365-1>
20. Kristensen A., Yang J.K.W., Bozhevol'yi S.I., Link S., Nordlander P., Halas N.J., Mortensen N.A. Plasmonic Colour Generation. *Nat. Rev. Mater.* 2016. Vol. 2, No. 1. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.88>
21. Abellán-Nebot J.V., Vila Pastor C., Siller H.R. A Review of the Factors Influencing Surface Roughness in Machining and Their Impact on Sustainability. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 5. art. no. 1917. <https://doi.org/10.3390/su16051917>
22. Zawadzki P., Dobrotvorskiy S., Aleksenko B., Talar R. Effect of Nano-Second Laser Texturization on Tribological Behavior of AISI 321 Stainless Steel. *Materials*. 2024. Vol. 17, No. 23. art. no. 5870. <https://doi.org/10.3390/ma17235870>
23. Martínez E., Lejeune N., Frechilla J., Porta-Velilla L., Fourneau E., Angurel L.A., de F., Bonse J., Silhanek A.V., Badía-Majós A. Laser Engineered Architectures for Magnetic Flux Manipulation on Superconducting Nb Thin Films. *Appl. Surf. Sci.* 2024. art. no. 161214. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161214>