

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Підвищення зносостійкості і маслоємкості робочих поверхонь втулок створенням регулярного макрорельєфу

Рівень вищої освіти: другий магістерський

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр: КРММТВА 25.24326.000. ПЗ

Виконав: студент 2 курсу,  
група МТВАм -24-1



Денис ЗОЗУЛЯ

Керівник, к.т.н., доцент



Олександр ДИХА

Нормоконтролер, к.т.н., доцент



Олег БАБАК

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри ТАМ



Олександр ДИХА

7 12 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра: трибології, автомобілів та матеріалознавства  
Рівень вищої освіти: другий магістерський  
Галузь знань: 13 Механічна інженерія  
Спеціальність: 132 Матеріалознавство  
Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ТАМ  
Олександр ДИХА

" 15" жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Зозуля Денис Валерійович

1. Тема роботи: Підвищення зносостійкості і маслоємкості робочих поверхонь втулок створенням регулярного макрорельєфу

ерівник роботи: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 25.08.2025р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 15.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

- 1) Дані про фізико-хімічні властивості деталей тертя приладів
- 2) Технічні умови на створення технологій локальної поверхнево-пластичної обробки
- 3) Матеріали переддипломної практики.
- 4) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Огляд літератури та аналіз сучасного стану проблеми формування функціональних поверхонь деталей
2. Методологія формування дискретно-орієнтованої топографії поверхні деталей
3. Створення робочої поверхні деталей рухомих вузлів приладів за функціональним призначенням
4. Дослідження топографії поверхонь пари тертя
5. Аналіз результатів досліджень дискретно-орієнтованої топографії поверхонь тертя

## 5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

6. Дата видачі завдання: 15 жовтня 2025р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд літератури та аналіз сучасного стану проблеми формування функціональних поверхонь деталей	1.11.2025	
2	Методологія формування дискретно-орієнтованої топографії поверхні деталей	15.11.2025	
3	Створення робочої поверхні деталей рухомих вузлів приладів за функціональним призначенням	20.11.2025	
4	Дослідження топографії поверхонь пари тертя	1.12.2025	
5	Аналіз результатів досліджень дискретно-орієнтованої топографії поверхонь тертя	5.12.2025	
6	Оформлення презентаційних матеріалів та пояснювальної записки	20.12.2025	

Студент



Денис ЗОЗУЛЯ

Керівник кваліфікаційної роботи



Олександр ДИХА

## РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 90 сторінок, кількість рисунків - 40, таблиць - 5, додатків - 2, кількість джерел згідно із переліком посилань - 17.

Студент гр. МТВАм-24-1 Зозуля Д.В.

**Тема «Підвищення зносостійкості і маслоємкості робочих поверхонь втулок створенням регулярного макрорельєфу»**

Актуальність роботи обумовлена розробкою технологічних процесів модифікації поверхонь деталей на основі проектування дискретно-орієнтованої топографії поверхонь тертя, що забезпечить поліпшення експлуатаційних характеристик деталі.

Мета роботи полягає в поліпшенні експлуатаційних характеристик деталей шляхом формування поверхонь з дискретно-орієнтованою топографією.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі основні задачі:

1. На основі аналізу проблеми обґрунтувати задачі зміцнення робочих поверхонь втулок з поліпшеними експлуатаційними характеристиками.
2. Розробити метод зміцнення внутрішніх поверхонь тертя втулок поверхнево-пластичною дискретною обробкою.
3. Розробити методики досліджень параметрів робочих поверхонь деталей втулок після дискретної поверхнево-пластичної обробки.
5. Розробити методику визначення режимів технологічного процесу формування поверхні втулок на основі їх геометричних і конструктивних параметрів та технічних характеристик обладнання.

**Перелік ключових слів:** підшипники ковзання, зносостійкість, дискретна обробка, поверхнево-пластична деформація, планування експерименту

## Зміст

### ВСТУП

## 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕКСТУРОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ.....6

1.1. Поняття інженерної та текстурованої поверхні

1.2. Класифікація текстур поверхонь та їх геометричні параметри

1.2.1. Форми та розміри мікроелементів

1.2.2. Щільність та розподіл текстур

1.3. Функціональні властивості текстурованих поверхонь

1.3.1. Зниження тертя та зносу

1.3.2. Резервуарна та гідродинамічна функції текстур

1.4. Біоміметичні підходи до формування поверхонь

## 2. ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ТЕКСТУРОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ.....23

2.1. Класифікація технологій формування текстур

2.2. Технології додавання матеріалу

2.2.1. Хімічні методи осадження

2.2.2. Фізичні методи осадження





2.3. Технології видалення матеріалу

2.3.1. Лазерне текстурування поверхонь

2.3.2. Електроерозійні та електрохімічні методи

2.4. Технології пластичного деформування поверхні

2.5. Самоорганізовані та комбіновані методи формування текстур

КРММТВА 25.24326.000. ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Зозуля		
Перевір.		Диха О		
Н.контр.		Бабак		
Затвер		Диха		
Підвищення зносостійкості і маслоємкості робочих поверхонь втулок створенням регулярного макрорельєфу			Літ.	Аркуш
				4
			ХНУ, гр. МТВАм-24-1	
			Аркушів	70

2.6.	Порівняльний	аналіз	технологій	текстурування	
3.	МАТЕРІАЛИ ТА ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....				32
3.1.	Вибір матеріалу підкладки				
3.2.	Фізико-механічні властивості досліджуваних матеріалів				
3.3.	Характеристика зразків з текстурованою поверхнею				
4.	МЕТОДИКА	ДОСЛІДЖЕННЯ	ТРИБОЛОГІЧНИХ	ВЛАСТИВОСТЕЙ.....	42
4.1.	Схема та умови проведення трибологічних випробувань				
4.2.	Методики оцінювання коефіцієнта тертя				
4.3.	Методики визначення інтенсивності зношування				
4.4.	Методи аналізу топографії поверхні				
4.5.	Похибки вимірювань та відтворюваність результатів				
5.	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....				52
5.1.	Вплив параметрів текстури на коефіцієнт тертя				
5.2.	Аналіз зносостійкості текстурованих поверхонь				
5.3.	Порівняння текстурованих і нетекстурованих зразків				
5.4.	Обговорення отриманих результатів				
6.	ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕКСТУРОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ				62
6.1.	Перспективи впровадження у вузлах тертя машин				
6.2.	Техніко-економічна оцінка застосування текстурування				
6.3.	Рекомендації	щодо	вибору	параметрів	текстури
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ					
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ					

## Вступ

Геометричні характеристики поверхні та її функціональність залежать від технології виробництва, що використовується для виготовлення та обробки. Отже, візерунчасті підкладки є неявно структурованими інженерними поверхнями, незалежно від типу візерунка (спрямований чи неспрямований). Інженерні поверхні виготовляються шляхом цілеспрямованої зміни поверхневих шарів та підшарів для досягнення точної функціональної продуктивності, як зазначали різні автори з моменту першої спроби характеристики та класифікації поверхні в 1930-х роках.<sup>1–3</sup>

У цьому огляді термін «текстуровані поверхні» використовуватиметься лише для позначення інженерних поверхонь, які мають численні інженерні особливості (мікроотвори, мікрошершавості), майже з точною формою та розмірами, які навмисно виготовляються для покращення функціональності. У літературі текстуровані поверхні також можуть називатися «структурованими» або «візерунчастими». Термін «текстура» також використовується для позначення обробки поверхні, включаючи три характеристики поверхні: шар, шорсткість та хвилястість.

У 20-му столітті вчені почали виявляти інтерес до обробки поверхні та того, як ці особливості поверхні впливають на характеристики трибологічних компонентів. На початку 1900-х років дослідження були зосереджені на виробничих технологіях, які дозволяють контролювати шорсткість поверхні для покращення зносостійкості. Текстура поверхні вперше була використана в 1940-х роках, коли технологія хонінгування була застосована для створення смуг на поверхні гільзи циліндра з метою покращення тертя, хоча корисний вплив текстури не був зафіксований та опублікований.<sup>5,6</sup>

Технологічний розвиток методів обробки поверхні продовжується з розвитком методу вібровальцювання у 1984 році,<sup>7</sup> текстурування поверхні стиранням та хімічним травленням у 1980-х роках,<sup>8</sup> та

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

використанням лазерної абляції у 1990-х роках.<sup>9–13</sup> Всі ці методи дозволяли використовувати макро- та мікротекстури, але відсутність точності та відтворюваності мікроелементів все ще становила проблему. Сьогодні сучасні методи дозволяють створювати високоточні та високоповторювані мікроелементи, починаючи від міліметра.

Як згадувалося, процес проектування/виробництва є тісно пов'язаний зі специфічними функціями, які текстуровані поверхні повинні виконувати під час їх використання в рамках практичного застосування. Тому це передбачає необхідні знання фізики, матеріалів та процесів на додаток до чітко визначеної функціональності. Крім того, локальні ефекти текстури поверхні (мікроефекти) повинні призводити до макровигідного ефекту, оптимізуючи продуктивність заздалегідь визначеного застосування. З самого початку до нанометрового розміру, що дозволяє краще контролювати дизайн поверхні та функціональні властивості. У цій статті пропонується загальна класифікація методів виготовлення текстур, що використовуються сьогодні в промисловому виробництві та на дослідницьких платформах, з відповідним описом кожного процесу, включаючи ключові переваги та недоліки щодо їх застосування в механічних системах.

## 1. Функціональна характеристика з текстурованих поверхонь тертя

Залежно від функціональності поверхні та використаного методу текстурування, текстура поверхні може бути сформована у вигляді мікроямок<sup>14–17</sup> або мікростовпчиків.<sup>18–21</sup> Характеристика текстур (а також їх функціональність) задається сумою їх основних геометричних характеристик, таких як форма, розміри (залежно від геометричної форми), щільність та розподіл на поверхні. Сьогодні текстури можуть знайти своє застосування в кількох галузях, таких як оптика, фізика, біомедицина, трибологія, енергетика, електроніка, метрологія.

Спочатку функціональні властивості текстурованих поверхонь були

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

натхненні природою (біоміметична наука). Найпоширенішим прикладом є ефект листя лотоса, штучно відтворений за допомогою нано- та мікроструктур, що призводить до зміни адгезійних властивостей контактів рідина-тверда речовина та знаходить своє застосування в самоочисних, водороздільних та протиобростаючих поверхнях.<sup>22</sup> Сильні сили адгезії між лапками гекона та підкладками є ще однією цікавою темою, яка призвела до широких досліджень текстури поверхні та технологій виготовлення.

Нещодавні дослідження представляють розробку дуже міцних адгезивних пристроїв з подібною текстурою поверхонь, що сполучаються.<sup>23</sup> Детальні огляди щодо функціональних властивостей текстурованих поверхонь та їх застосування можна знайти в попередніх роботах<sup>24–28</sup>, тоді як короткий виклад функціональних властивостей текстур та їх застосування представлено в таблиці 1.

У трибології переваги текстурування поверхонь згадуються в науковій літературі з 1960-х років<sup>29</sup> і досі є цікавим питанням для сучасних дослідників. Протягом півстоліття більшість експериментальних та числових досліджень з цієї теми дійшли висновку, що використання текстурованих поверхонь може сприяти покращенню трибологічних характеристик різних механічних компонентів.

Залежно від режиму змащування, текстури можуть виконувати три основні ролі: (i) уловлювач сміття; (ii) резервуар мастила та (iii) мікрогідродинамічний підшипник. Захоплення сміття або домішок від зносу є одним з основних ефектів присутності текстури в будь-якому типі контакту (конформному чи неконформному) та в будь-якому режимі змащування (особливо сухому та граничному). Це призводить до зменшення зносу, збільшення терміну служби компонентів та покращення стійкості до фреттинг-втоми.<sup>30–32</sup> Для контактів з граничним та змішаним змащуванням текстури діють як мікрорезервуари, забезпечуючи мастило всередині контакту протягом усього робочого періоду.<sup>33–35</sup> Текстури можуть однаково грати роль

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

мікрорезервуарів для твердих мастил, як показано Мошковітом та ін.<sup>36</sup>

Мікрогідродинамічні текстури підшипників створюють додатковий гідродинамічний тиск, окрім тиску, що генерується іншими відомими механізмами (шорсткість поверхні, хвилястість, ексцентрикове обертання, стискання тощо). Цей ефект пояснюється механізмом ступінчастого підшипника: тиск збільшується в області зближення (коли рідина наближається до сходинки-шершавості) і зменшується в області розбіжності, при цьому падіння тиску обмежується тиском кавітації, який не компенсує збільшення тиску в області розбіжності, тому створюється додаткова несуча здатність.<sup>37,38</sup>

Тим не менш, оптимізовані параметри текстури завжди виявлялися ефективними для певного застосування в певних робочих умовах, що ускладнює застосування текстур у великих масштабах у промислових застосуваннях з двох основних причин: витрати, пов'язані з числовим або експериментальним параметричним дослідженням, необхідним для визначення оптимальної текстури для кожного застосування, та контроль великої кількості робочих параметрів, які зазвичай демонструють зміни протягом робочого періоду (температура, тиск, швидкість, властивості мастила тощо).

Так само не слід нехтувати висновком різних авторів, що текстуровані поверхні в певних випадках мають негативний вплив, що проявляється у підвищеному зносі текстурованої деталі або/та контактних поверхонь,<sup>39,40</sup> збільшеному терті,<sup>16,34,35</sup> а також у всмоктуванні мастила з контактної поверхні.<sup>41</sup>

## 2. Технології виготовлення

Методи виробництва спрямовані на покращення функціональних властивостей поверхні шляхом модифікації топографії: створення структур або отворів регулярної форми, які утворюють повторюваний візерунок (однорідний нано- або мікрорельєф). Для загальної

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

класифікації, процеси виготовлення можна розрізнити залежно від способу маніпулювання речовиною для створення текстури поверхні, як описано нижче (див. також додатки):

- Додавання матеріалів за технологіями: текстура отримується за допомогою хімічних або фізичних процесів осадження, в результаті чого утворюються нано- або мікроструктури різних форм.
- Технології видалення матеріалів: створення мікроотворів шляхом видалення матеріалу підкладки з використанням різних методів.
- Технології переміщення матеріалу: підкладка пластично деформується та перерозподіляється з одного місця в інше, змінюючи структуру поверхні.
- Методи самоформування: текстура утворюється після низки специфічних процесів, що передбачає довший час виготовлення. Спочатку на підкладці формуються зносостійкі області, щоб під час періоду припрацювання поверхневе зношування призводило до розвитку текстури.

Точніше, зносостійкі зони, які не зазнають впливу під час періоду припрацювання, розташовані над навколишнім зношеним матеріалом, створюючи певний малюнок.

Однак важливо зазначити, що залежно від кожного застосування, тобто бажаних функціональних властивостей поверхні, ця класифікація може ґрунтуватися на інших критеріях, таких як точність, час виготовлення, температура, хімічні реакції, вартість тощо.

### 3. Матеріали для створення текстурованих поверхонь

Цей клас методів, як випливає з назви, базується на методах хімічного або фізичного осадження, що використовуються для створення тонких плівок на різних підкладках. Хімічні процеси базуються на хімічних реакціях між підкладкою та осадженими частинками (реагентами), тоді як методи фізичного осадження базуються на таких процесах, як

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

агрегація, затвердіння, випаровування та розпилення.

Хімічні технології. Будь-який процес хімічного перетворення або текстурування осадженням вимагає підготовчого етапу перед фактичною обробкою. На цьому першому етапі візерунок зі спеціальної фарби друкується безпосередньо на підкладці. Чорнило буде гальмувати або стимулювати хімічні чи електрохімічні реакції під час самого процесу, створюючи візерунчасте покриття. Для металевих підкладок спочатку на підкладку наноситься дуже тонке покриття, щоб уникнути електричних розрядів між підкладкою та осадженими частинками під час процесу текстурування, після чого йде етап маскування та остаточне текстуроване покриття.<sup>23</sup> Методи хімічного перетворення – це пасивні методи, що використовуються для створення дуже тонких шарів, що складаються з хроматів (хроматизування), фосфатів (фосфатування) або оксидів (окислення), за допомогою гальванічних або хімічних рецептів, тобто водних ванн або кислотних атак, які викликають спонтанне утворення антикорозійної плівки. Однак, детальна інформація про текстуровані підкладки, отримані за допомогою цих методів, відсутні в науковій літературі.

Під час обробки хімічним осадженням з парової фази (CVD) підкладка піддається впливу одного або кількох летких прекурсорів, які реагують та/або розкладаються на підкладці, утворюючи тонку плівку. Формування малюнка відбувається завдяки використанню маски-екрану, яка зазвичай складається з інгібіторів росту або адгезії, нанесених на підкладку за допомогою техніки мікроконтактного друку (mCP) або штампування. Методи CVD класифікуються залежно від робочого тиску (низький або надвисокий вакуум), фізичних характеристик пари (аерозоль, інжекція рідини), джерела енергії, що використовується під час процесу (плазмове посилення — Рисунок 2(b), полум'я горіння, нагрівальні лампи, УФ-світло). Зазвичай, CVD використовується для осадження таких матеріалів, як кремній (Si), діоксид кремнію (SiO<sub>2</sub>), кремній-германій (SiGe), карбід кремнію (SiC) та нітрид кремнію (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), нітрид титану (TiN), вольфрам (W), вуглецеве волокно, нановолокна та

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нанотрубки, нитки та метали, тобто алюміній (Al), мідь (Cu), молібден (Mo), тантал (Ta), титан (Ti) та нікель (Ni).<sup>42</sup> Цей процес також використовується для створення самоорганізованих моношарів (SAM). Точніше, вирощування SAM може бути отримано за допомогою багатоетапного процесу, який полягає в поєднанні mCP та CVD на різних матеріалах підкладки, таких як метали (срібло Ag,<sup>43</sup> золото Au,<sup>43</sup> Al, TiN<sup>44</sup>), скло та полімери.<sup>42,45</sup> Плазмо-покращена CVD (PE-CVD) використовує холодну плазму (термодинамічну нерівноважну плазму) і використовується як обробка покриття для металів для покращення їхніх трибологічних властивостей, тобто фрикційних властивостей та зносостійкості.

Головною перевагою процесу CVD є його гнучкість з точки зору геометрії текстури, оскільки можна отримати безперервні та переривчасті мікростовпчики/мікроотвори різної форми. Текстури мають висоту від десятків нм до кількох мм, а поперечні розміри обмежені не менше ніж кількома мікрометрами. Метод однаково підходить як для плоских, так і для циліндричних підкладок, його роздільна здатність певною мірою залежить від процесу маскування.

Основним недоліком є вичерпні знання хімії, необхідні для вибору інгібіторів, осаджуваних матеріалів та матеріалів підкладки. Навіть для сумісних компонентів висота текстури обмежена та залежить від матеріалу підкладки. Ще однією незручністю є реакційна камера, яка накладає обмеження на розміри заготовки, текстурувати можна лише малі та середні підкладки (<500 мм), тоді як процес можна визначити як екологічно небезпечний, оскільки він вимагає використання токсичних газів.

Процес CVD використовується для створення покриттів та поверхневих візерунків із застосуванням у різних галузях, таких як трибологія,<sup>46–49</sup> виробництво,<sup>44,49</sup> оптика,<sup>45</sup> електроніка,<sup>43,45</sup> та фотоелектричні технології.<sup>50,51</sup>

Автокаталітичне покриття, тобто безструмове покриття, базується на

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

реакціях відновного окислення, які відбуваються одночасно, коли заготовка занурюється у ванну з водним розчином.<sup>52–54</sup> Оскільки процес базується лише на хімічних реакціях, він не вимагає використання електроенергії та має нижчі витрати порівняно з усіма іншими методами фізичного осадження.

Подібно до CVD, цей метод передбачає використання mCP або штампування для нанесення каталізатора (активатора), що дозволяє осадження металу. Отримані мікроструктури можуть мати різну форму (прямокутні, круглі, лінійні смуги) з висотою та поперечними розмірами від менш ніж одного мм до десятків мм. Хоча метод має деякі ключові переваги, тобто низькі температури, високу роздільну здатність, швидку обробку, низьку вартість, він залишається складним процесом, де шорсткість поверхні змінюється та залежить від розмірів молекул, що використовуються для покриття. Навіть якщо він має хорошу точність, забезпечуючи рівномірну та компактну нанесену плівку, іноді повідомляється про наявність покривного матеріалу в неактивованій області.<sup>52</sup>

Техніка електроосадження (гальваніки) - це використовується для створення металевого покриття на підкладці (яка грає роль електрода) за допомогою електричного струму, і знаходить своє основне застосування в промисловості електричних роз'ємів. Мідь, латунь, сталь і фосфориста бронза зазвичай використовуються як підкладки при нанесенні шарів золота або нікелю. При використанні для текстурування цей метод вимагає використання маскувального екрану для створення візерунка на попередньо нанесеній фоторезистивній плівці, що зазвичай пов'язано з літографічними та LIGA-технологіями.<sup>55,56</sup> Основні переваги полягають у великій різноманітності геометрій текстур, які можна отримати: дискретні прямокутники, трикутники, шестикутники та шеврони, лінійні або хвилясті безперервні лінії. Поперечні розміри зазвичай задаються технікою друку, яка використовується для створення маскувального

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

екрану, що захищає необроблені ділянки, і коливаються між від 2 до 1000 нм, тоді як висота/глибина варіюється від 800 нм до 2 мм.<sup>55–58</sup> Основними недоліками гальванічних шарів є: (i) високий вміст водню, що іноді призводить до крихкості; (ii) відсутність однорідності (процес формування визначається силою електричного поля) — кути, краї, виступи покриваються швидше, ніж плоскі поверхні; та (iii) суворі обмеження, які іноді накладаються на форму та розміри покритого компонента. Більше того, процес LIGA, тобто літографія-гальванічне покриття-лиття, може використовуватися лише для електроосаджених металів, кераміки та гуми, і він може бути дорогим залежно від джерела випромінювання, що використовується для створення захисного екрану.<sup>21</sup>

Повідомлялося, що поверхні, гальванізовані золотом та нікелем, призводять до зниження коефіцієнта тертя ( $\sim 0,1$ ) в умовах змащення, покращення зносостійкості та швидкості витоків у динамічних ущільненнях<sup>21,56</sup> та опорних підшипниках.<sup>55</sup>

Обладнання для хімічного та гальванічного покриття може бути адаптоване для текстурування плоских та циліндричних заготовок без обмежень щодо розмірів. Звичайно, вартість виробництва зростатиме зі збільшенням розмірів зразків.

#### 4 Методи фізичного осадження.

Як згадувалося раніше, методи фізичного осадження базуються на таких процесах, як агрегація, затвердіння, випаровування та розпилення.

Наприклад, метод струменевого друку передбачає осадження твердих частинок (провідних полімерів, структурних полімерів, кераміки та металів) для формування зносостійких рельєфів. Тверді частинки транспортуються до підкладки через рідкі прекурсори (колоїдні розчини, золь-гель) та утворюють різні мікроструктури після випаровування та/або затвердіння прекурсора.<sup>59–62</sup> Метод струменевого друку (mCP) як

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

частина літографічних методів (фотолітографія, м'яка літографія) зазвичай використовується для створення наноструктур для гідрофобних/олеофобних підкладок. Метод успішно застосовується для створення функціонально градієнтних шарів кераміки або полімерів, мікро- або нано-напівсфер (утворених шляхом осадження однією краплею) або мікростовпчиків (утворених шляхом послідовного осадження крапель).

Однією з ключових переваг струменевого друку є використання точкового методу нанесення, який забезпечує хорошу точність кінцевих структур.

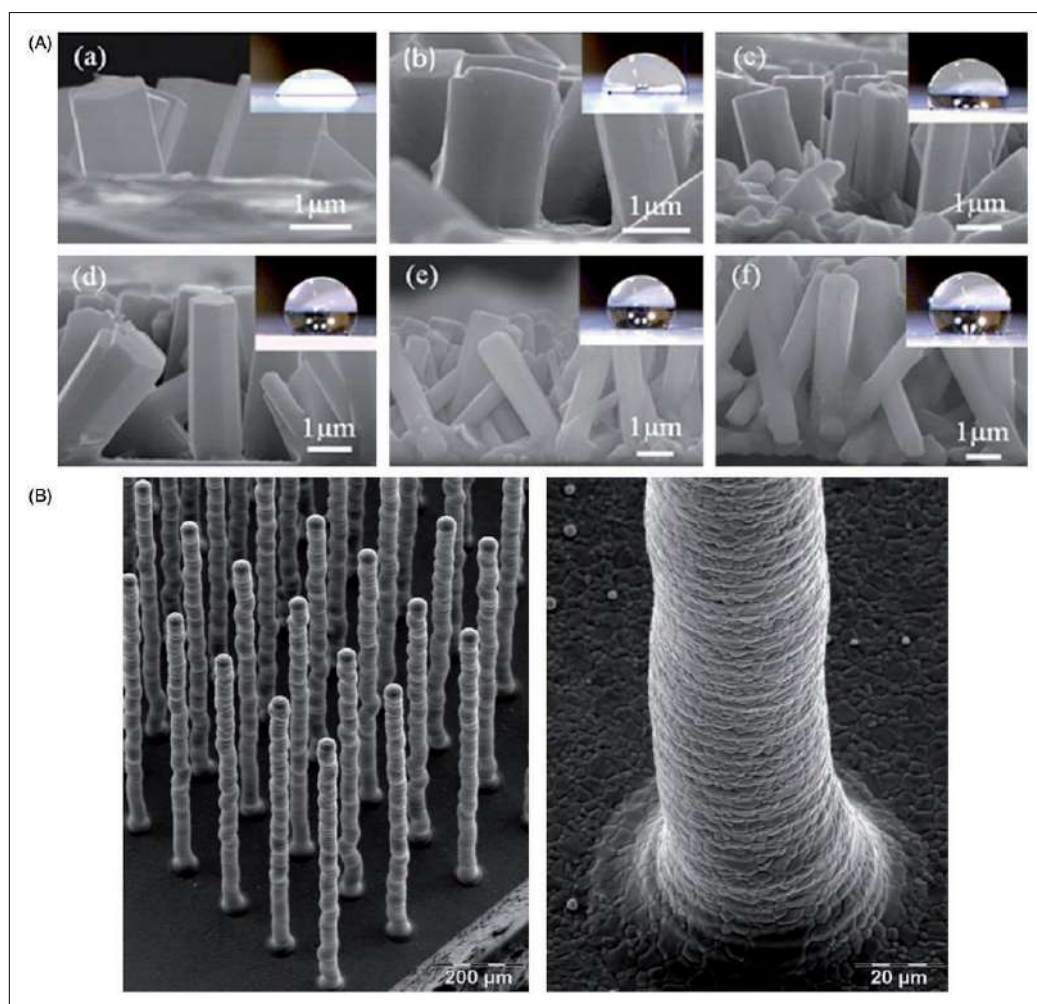


Рисунок 1. Мікростержні ZnO різної висоти, вирощені на плоских предметних стеклах мікроскопа (вставка: вимірювання кута змочування води на(масиви мікростержнів) (A).60 Передруковано з Myint et al.,60 з дозволу Elsevier. Сканування

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електронних зображень спечених мікростовпчиків  $TiO_2$ , виготовлених на зеленій стрічці  $TiO_2$  шляхом одночасного електричного керування різними соплами друкуючої головки (апертура 52 мкм) чорнилом 5 (завантаження  $TiO_2$  15 об.%, високомолекулярне зв'язуюче, співвідношення кераміка/зв'язуюче: 75/25, поверхнево-активна речовина) (В).<sup>19</sup> Передруковано з Lejeune et al.,<sup>19</sup> з дозволу Elsevier.

Розміри мікроелементів варіюються від 5 до 900 мкм заввишки та від 20 до 200 мкм поперечних розмірів. Роздільна здатність друку залежить від роздільної здатності струменевого принтера, діаметра частинок та характеристик матеріалу.<sup>24</sup> Метод підходить для плоских підкладок зі зменшеними розмірами, враховуючи метод точкового текстурування. Однак система, що складається з кількох паралельних сопел (що спрямовують рідину до підкладки), повинна підвищити ефективність методу та зробити його придатним для обробки більших підкладок.

Струменевий друк може бути використаний для створення супергідрофобних поверхонь (наприклад, вирощування мікроструктур оксиду цинку ( $ZnO$ ) на візерунчастих скляних підкладках, див. Рисунок 1(А)) або жолобів з дуже високими мікростовпчиками.

послідовне осадження чорнила (осадження п'єзоелектричної кераміки або частинок діоксиду титану на підкладки з тих самих матеріалів, рис. 1(В)). Автори повідомили про хорошу компактність та укладання послідовно осаджених шарів, хорошу швидкість ущільнення та високу механічну міцність керамічних мікроструктур.<sup>18</sup> Недостатній час кристалізації між послідовними осадженнями крапель іноді може призвести до утворення текстурних дефектів.<sup>59</sup>

Струменевий друк був успішно застосований для створення мікроточок на основі епоксидного полімеру на кремнеземних підкладках з можливим застосуванням у MEMS (мікроелектромеханічних системах).<sup>61,62</sup> Автори досліджували поведінку текстурованих підкладок у

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

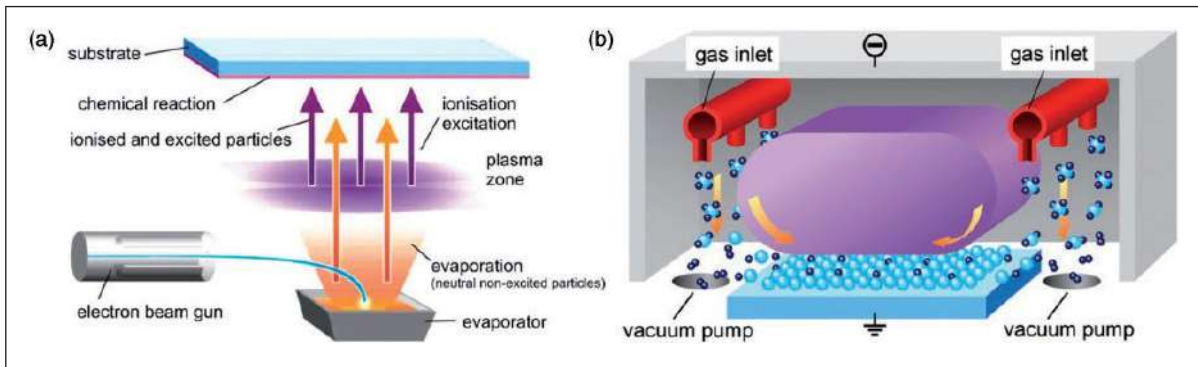


Рисунок 2. Принцип випаровування електронним пучком за допомогою плазми (а) та формування DLC за допомогою PACVD (схема) (b).58  
Передруковано з Bewilogua et al.,68 з дозволу Elsevier.

випробування на ковзання куля по плоскій поверхні та плоска поверхня по плоскій поверхні в присутності нано-мастила (фторованого мастила) та дійшли висновку, що як коефіцієнт тертя, так і знос зменшуються порівняно з плоскими нетекстурованими зразками. На думку авторів, покращені трибологічні характеристики можуть бути зумовлені як зменшенням площі контакту, так і наявністю нано-мастила.

Одним з головних недоліків є відсутність детальної інформації про застосовність методу на металевих поверхнях та їхню поведінку в механічних компонентах.

Процес візерункового затвердіння (PCP) використовує хімічні добавки (затверджувачі),63–65 УФ-випромінювання,65 тепло або електронні промені для ініціювання затвердіння полімеру (зшивання полімерних ланцюгів) та створення твердих плівок на підкладці. Подібно до раніше представлених методів, PCP іноді вимагає використання mCP для створення захисної візерункової маски. Візерункові плівки або мікропористі підкладки можуть бути створені з силіконів, полімерів на основі кремнію, лаків та смол. Метод підходить для створення різних текстурних форм з висотою та поперечними розмірами в кілька мікрометрів. Процес швидкий, не використовує летких продуктів і підходить для жорстких та гнучких

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підкладок, а також плоских та циліндричних заготовок.

Коли металеві частинки осаджуються, текстури демонструють добру механічну та хімічну стійкість. Високі температури, які іноді потрібні для спікання (термічного затвердіння), можуть становити проблему залежно від матеріалу підкладки (пластикові матеріали). Точність методів не дуже висока і, здається, залежить від часу контакту між штампом та підкладкою: короткий період контакту може призвести до погано конденсованих візерунків, тоді як тривалий період контакту може призвести до розмитих візерунків.

Завдяки постійному технологічному розвитку, доступне обладнання для УФ/ЕП-затвердіння зі зменшеними розмірами та низьким енергоспоживанням. Сьогодні технології УФ- та ЕП-затвердіння доступні в усьому світі за низькими та помірними цінами.

Цей процес також використовується в анілокових друкарських системах (візерунчасті валики) для отримання візерунчастих термореактивних полімерних структур на плоскій підкладці.<sup>66</sup> Як і струменевий друк, цей процес зазвичай є попереднім кроком складніших візерунчастих технік.<sup>67</sup>

Методи фізичного осадження з парової фази (PVD) класифікуються на основі фізичного процесу, який активує випаровування: підведення тепла (випарне осадження, електронно-променеве осадження — EBPVD — рисунок 2(a), іонно-променеве осадження (IBPVD), електричний розряд (дугове випаровування — дугове PVD) або передача енергії (розпилення, імпульсне лазерне осадження PLPVD). Корисний вплив плівок, отриманих методом PVD, полягає в покращенні фрикційних властивостей та підвищеній зносостійкості, особливо для змащених контактів.<sup>69–72</sup> Однак іноді спостерігалось відшаровування та деградація плівки за відсутності мастила (сухий контакт), тобто плівка повністю видалялася після 15 хвилин випробування, і тому основним недоліком можна вважати довговічність плівки.

Сталеві диски з покриттям з нітриду титану (TiN) та нітриду хрому

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

(CrN), виготовлені методом маскованого дугового PVD, були випробувані в умовах змащення в геометрії «штифт на диску»,<sup>70,71</sup> для трибологічних застосувань. Автори дійшли висновку, що візерунчасті диски демонструють кращі трибологічні характеристики з точки зору втрат на знос, тертя та терміну служби компонентів, ніж повністю покриті. Їхні результати були також зафіксовані для випробувань на сухе ковзання плівок TiN та CrN, нанесених на сталь.<sup>72</sup> Однак важливо зазначити, що як знос плівки, так і фрикційна поведінка системи залежать від швидкості ковзання та зміни температури, що пов'язано з адгезійною міцністю плівки на підкладці, тобто підвищена температура може зменшити втрати на знос покриттів CrN, але збільшити втрати на знос покриттів TiN. Технології PVD та CVD також використовуються для нанесення самоорганізуючихся полікристалічних плівок, тобто алмазоподібних вуглецевих плівок (DLC) з різними галузями застосування:<sup>73,74</sup> трибологія, мікроелектроніка, виробництво, транспорт, біомедицина тощо.

Ключові переваги полягають у різноманітності геометрії малюнка, яку можна отримати за допомогою PVD, зниженій температурі обробки порівняно з іншими методами (лазер, сфокусований іонний промінь тощо) та підвищенні твердості підкладки після обробки. Незважаючи на те, що методи CVD та PVD можуть забезпечити якісні плівки покриття без пошкодження підкладки, як у випадку високотемпературних методів, вони мають деякі недоліки: (i) адгезія твердих металевих частинок до не може гарантувати якість підкладки; іноді для покращення адгезії наноситься проміжний шар (Ti, Si, Al, Cr);<sup>69</sup> (ii) повільна швидкість осадження обмежує товщину плівки; (iii) пара (плазма) заповнює всю вакуумну камеру, тому вона може осідати на інших поверхнях, не лише на бажаній підкладці; (iv) обмежений розмір текстур, залежно від частинок, що використовуються для створення шарів, та отворів маскувального екрану, які повинні бути достатньо великими, щоб

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частинки пари могли проходити крізь них; (v) обмежені розміри підкладки через розміри реакційної камери; (vi) іноді спостерігалася дифузія навколо країв, локальне розм'якшення та плавлення підкладки через електричні іскри, що утворюються між гострими краями маски та підкладкою.

Методи CVD та PVD доступні на ринку як для малосерійного, так і для великосерійного виробництва текстурованих деталей. Хоча їх можна успішно використовувати для текстурування плоских або циліндричних заготовок, ці методи можна застосовувати до складних 3D-прототипів (тобто внутрішньої поверхні циліндра).<sup>75</sup>

Зазвичай, як CVD, так і PVD вимагають використання камер надвисокого вакууму або нагрівальних печей, вартість яких може сягати півмільйона євро.<sup>76–78</sup> Таким чином, цей метод можна вважати дорогим порівняно з іншими методами хімічного осадження, навіть якщо він є недорогим порівняно з лазерними технологіями.

Мікро- та наночастинки також можна осаджувати методом спінінгового покриття. Цей метод можна використовувати як підготовчий етап для інших методів осадження, таких як PVD, фотолітографія та золь-гель покриття. Спінінгове покриття можна використовувати для осадження мікро- та наночастинок як маскувального екрану під час основної обробки покриття (PVD, CVD тощо), що призводить до утворення мікро- або нанопорожнинних порожнин на підкладці після їх видалення.

Цей процес вже використовувався для трибологічних<sup>79,80</sup>, оптичних<sup>81,82</sup> та поверхнево-енергетичних застосувань.<sup>83,84</sup> Наприклад, Цзоу та ін.<sup>79</sup> використовували центрифугування для створення нанотекстурованої підкладки шляхом нанесення колоїдних наночастинок кремнію на плоску кремнієву пластину. Нанотекстуровані підкладки продемонстрували покращені трибологічні властивості після текстурування (коефіцієнт тертя зменшився на 88% порівняно з підкладкою, покритою оксидом кремнію).

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Центрифугування було успішно використано для створення самоочисних поверхонь. Ван дер Валь<sup>84</sup> використав цей метод для нанесення колоїдів Teflon® на скляні підкладки. Автор спостерігав значне збільшення кута контакту (більше 170° для води) для текстурованої підкладки.

### 5. Термічна імплантація.

Лазерне мікроплакування – це нова техніка текстурування та покриття, яка дозволяє контрольоване закріплення матеріалу з різними металургійними властивостями (попередньо нанесені порошки карбідів, металів та металевих сплавів<sup>85–88</sup>) на заданій підкладці шляхом наплавлення тонкого шару підкладки з порошком сплаву з мінімальним розведенням матеріалу покриття. Це схоже на термічну імплантацію.

техніка, але її можна класифікувати радше як технологію додавання матеріалів, ніж як технологію самоскладання. Процедура використовує лазери з високою продуктивністю при низькій та середній потужності, тобто діодні лазери,<sup>85</sup> лазери на газоподібних середовищах<sup>86</sup> та волоконні лазери<sup>88</sup>, щоб забезпечити формування шарів з малою або відсутністю пористості та відмінним зв'язуванням з підкладкою. Ця техніка використовувалася для текстурування різних металевих підкладок, таких як сталь та титанові сплави.<sup>85–88</sup>

Зв'язувальний шар повинен бути якомога тоншим, забезпечуючи при цьому добре зчеплення між двома використовуваними матеріалами. Слід уникати надмірного розведення порошку покриття на підкладці, щоб забезпечити хорошу стійкість до втоми та зносу. Процес плакування має численні переваги: (i) контрольований тепловий вплив (рис. 3(b) та (c)); (ii) невелике розведення порошку покриття, отже, незначні зміни металургійних властивостей матеріалу; (iii) низьке технологічне напруження; (iv) здатність створювати складні геометрії (структури, подібні до перехресних ребер, радіальні, круглі мікроелементи,

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

градуировані відкладення) з висотою 6 мм–22 мм та шириною 0,3–50 мм, як показано на рисунку 3(a); (v) хороша точність та швидка обробка. Основне обмеження полягає в розмірі частинок легуючого порошку, який повинен бути щонайменше половиною розміру меншого виготовленого елемента та повинен бути транспортований на підкладку, що впливає на розміри текстури. Неоднорідні структури іноді отримують, коли частинки порошку нерівномірно розподілені на поверхнях.<sup>88</sup> Розмір плями лазерного променя також повинен бути дуже малим, щоб дозволити створення дрібних мікрометричних структур (менше 20 мм).

Лазерне плакування використовувалося для створення текстурованих компоненти для трибологічних застосувань різними авторами.<sup>85–86,88,89</sup> Гаррідо та ін.<sup>85</sup> використовували лазерне мікроплакування для нанесення NiCrBSi на плоскі сталеві підкладки, які потім були текстуровані за допомогою лазерної технології. Випробування на зворотно-поступальний рух зі змащеним штифтом на пластині показали, що текстуровані зразки (покриті круглими заглибленнями) демонструють знижені коефіцієнти тертя для всіх випробуваних швидкостей. Аналогічно, автори припускають, що використання малого діаметра заглиблень та великої кількості заглиблень покращує трибологічну поведінку зразків.

Подібні результати були отримані Отеро та ін.<sup>88</sup>, які досліджували трибологічну поведінку сталевих та титанових підкладок, плакованих різними порошками (Ti, Ni, Cr, W тощо). У їхньому випадку використовуються текстури поверхні у формі прямих ліній, радіальних, ребристих та концентричних кіл. Випробування на зношування, проведені авторами (випробування на лінійне тертя зі змащенням з геометрією штифта на диску), виявили покращену поведінку з меншими коефіцієнтами тертя для всіх текстурованих зразків та майже відсутність втрат зносу для зразків зі структурою титану.

Цей процес також може бути використаний для твёрдосплавного

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

наплавлення та ремонту механічних компонентів різного застосування: 90 турбін, перехідних вкладишів, кілець статора, гідравлічних опор, поверхонь валів та підшипників, компонентів свердління, ливарних форм тощо.

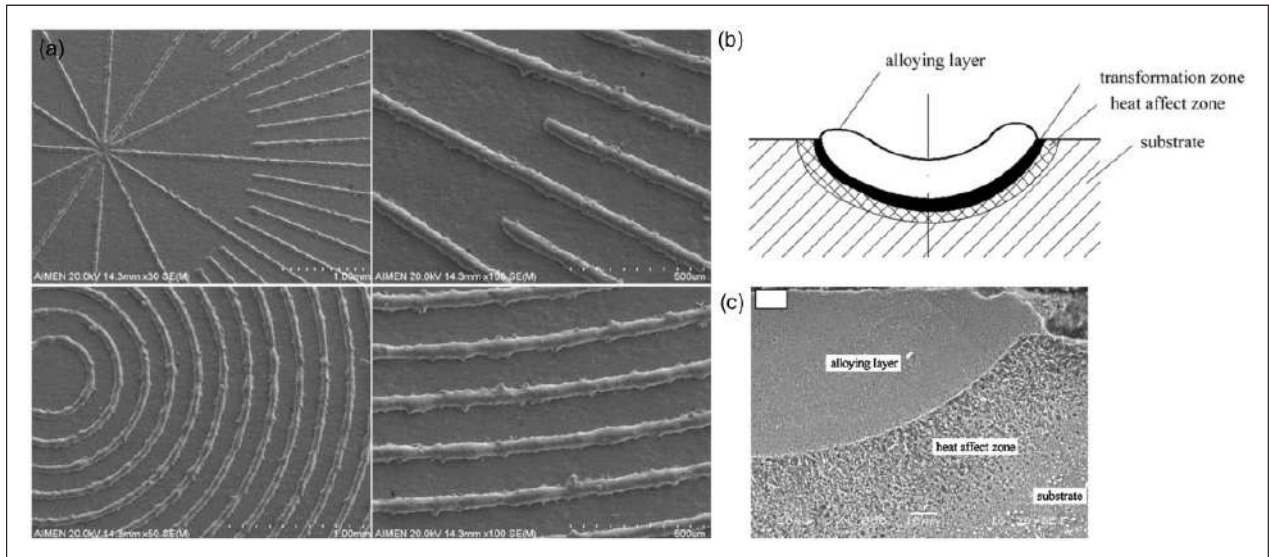


Рисунок 3. Складна кругова геометрія, отримана на підкладці з титанового сплаву за допомогою технології мікроплакування (a).<sup>73</sup> Відтворено за допомогою дозвіл від Японського товариства лазерної обробки. Схематичне зображення отвору для лазерного покриття-текстурування (b) та морфології мікроскопії плакований шар з видимою зоною термічного впливу (c).<sup>72</sup> Передруковано з Wan et al.,<sup>87</sup> з дозволу Elsevier.

Лазерне напилення вимагає дорогого обладнання (особливо лазерного джерела), вартість якого сягає півмільйона євро, і тому його можна вважати дорогим методом текстурування.

## 6. Технології видалення матеріалів

Технології видалення матеріалів поділяються на процеси, що передбачають високі температури під час текстурування (лазерні технології, методи електророзряду, електронно-променеві або іонно-променеві методи), хімічні реакції (травлення) або механічні процеси (шліфування, хонінгування,

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ультразвукова обробка та дробоструминна обробка). Лазерні технології та хімічне травлення є найпоширенішими методами, що використовуються для створення візерункових поверхонь. Незважаючи на вплив температури на підкладку (через лазерний промінь) або деякі труднощі в управлінні процесом травлення, ці методи дозволяють формувати чітко визначену геометрію безперервних або переривчастих текстур як на плоских, так і на неплоских поверхнях.

Методи високої температури. Технологія лазерного текстування базується на процесі абляції, точніше, надмірному нагріванні та плавленні матеріалу підкладки, що контактує з лазерним променем, що локально видаляє розплавлений матеріал зі створеного мікроотвору. Класичні напівсферичні текстури, створені за допомогою лазерних технологій, відомі в науковій літературі як ямки. Лазерний промінь може бути створений з використанням різних середовищ, таких як: (i) газоподібні середовища (аргон Ar, криптон Kr, ксенон Xe, гелій-неон He-Ne, азот N<sub>2</sub>); (ii) газоподібні середовища, активовані електричним розрядом (аргон-фтор ArF, криптон-фтор KrF, хлорид ксенону XeCl тощо); (iii) пари металів (Cu, Au, гелій-кадмій HeCd, гелій-селен HeSe тощо); (iv) напівпровідникові середовища (нітрид галію GaN); (v) твердотільні середовища (ітербій, ербій, тулій, гольмій та інші рідкісні кристали). Волоконні лазери та Nd:YAG лазери (леговані неодимом ітрієм алюмінієві-номер гранат) є найпоширенішими.<sup>91–95</sup>

Точність текстури залежить від способу проектування лазерного променя на підкладку. Несфокусований лазерний промінь практично розсікається за допомогою швидко обертового перфорованого диска для створення візерунків.<sup>86</sup> Однак ця техніка рідко використовується на практиці через обмежену роздільну здатність (розміри текстури сотні мікрометрів), гнучкість (сумісність з плоскими поверхнями та трудомістке калібрування) та точність (форма текстури нерівномірна,

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

абляційний матеріал розподіляється навколо текстур). Іноді джерело газу використовується для видалення розплавленого матеріалу з текстурованої зони, щоб запобігти утворенню опуклостей або гребенів навколо краю текстури та окисленню металу.<sup>96,97</sup>

Текстури також можна створювати за допомогою візерунчастої маски для розділення променя, що проектується на підкладку. Цей метод використовується, зокрема, для ексимерних лазерів, де промінь направляється, фокусується та концентрується через систему лінз, тоді як процес контролюється за допомогою площинного руху геометричної опори, як показано на рисунку 4(а).<sup>98–101</sup> Маска дозволяє створювати мікроелементи різної форми (кола, квадрати, трикутники тощо). Метод є гнучким та швидким, з дуже хорошою точністю та роздільною здатністю. Роздільна здатність процесу залежить від довжини хвилі лазера, розміри текстури залежать від розміру плями (задається оптикою системи), тоді як глибина текстури задається кількістю імпульсів та їх тривалістю (зазвичай від мс до фс).<sup>102–104</sup> Однак, вартість виробництва маски є основним недоліком цього методу.

Третій метод використовує гальванометричний сканер та систему ЧПК (систему числового програмного керування) для направлення лазерного променя на підкладку.

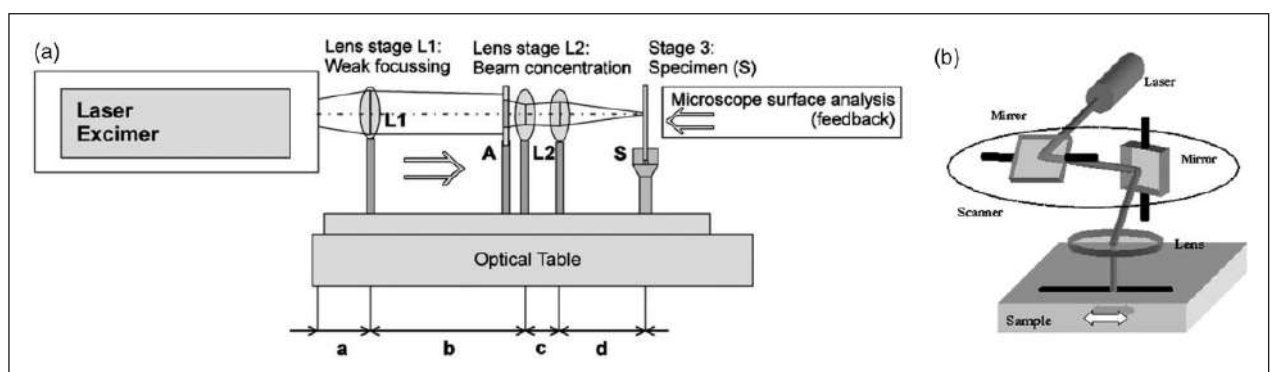


Рисунок 4. Схематичне зображення лазерної ексимерної системи з технологією сканування (а): L1 — фокусувальна лінза, L2 — антиабераційний елемент-лінзи, A — апертура, S — зразок.<sup>85</sup> Передруковано з Prina-Mello et

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

al.,<sup>101</sup> з дозволу Elsevier. Керування лазерним променем завдяки гальванометричному сканеру (b).<sup>84</sup> Передруковано з Vincent et al.,<sup>107</sup> з дозволу Springer Science and Business Media. Метод лазерної обробки на станках з ЧПК забезпечує високу точність завдяки використанню дуже коротких імпульсів (тривалість імпульсу від ps до fs), при цьому розміри текстури становлять лише кілька мікронів. Однак процес дуже трудомісткий (кожна текстура обробляється окремо), що ускладнює текстуровання великих площ. Високі співвідношення сторін можна отримати, зменшивши тривалість імпульсу, тоді як її збільшення призводить до швидшої обробки, але збільшення зони термічного впливу (HAZ) поблизу меж текстури.

Глибина та співвідношення сторін текстури контролюються тривалістю лазерного імпульсу, довжиною хвилі та потужністю. Вища потужність та довші довжини хвиль (збільшення від 532 нм до 1064 нм) призводять до поступового збільшення розмірів текстури (поперечного розміру, глибини) та складності.<sup>86</sup> При використанні тривалості імпульсу ps видалення матеріалу відбувається через плавлення та випаровування, і, як наслідок, на підкладці утворюються неминучі ділянки термічного впливу. У випадку імпульсів fs видалення матеріалу відбувається через випаровування підкладки, і тому теплова дифузія гальмується, а ділянки, що піддаються впливу головки, зменшуються, що призводить до кращої якості текстурованої поверхні.

Тривалість імпульсу варіюється від одного лазера до іншого і зазвичай залежить від джерела випромінювання, яке створює промінь. Найпоширенішими є імпульсні твердотільні лазери, такі як Nd:YAG або неодієвий, з тривалістю імпульсу від 30 фс до 30 пс. Волоконні фемтосекундні лазери мають тривалість імпульсу 50–500 фс, тоді як лазери на барвниках мають тривалість імпульсу ~10 фс, але використовуються рідко. Методи лазерного текстуровання можуть бути використані для формування структури на різних матеріальних основах, таких як метали (сталь,<sup>105,106</sup> залізо,<sup>107</sup> титан,<sup>108</sup> нікель,<sup>88</sup> чавун<sup>96</sup>),

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

металеві сплави (сплави на основі міді, такі як свинець, олово, алюміній, бронзи,<sup>88</sup> сталеві сплави;<sup>85</sup> нікель<sup>105</sup>), нітрид кремнію,<sup>17,95</sup> карбід кремнію<sup>9,109</sup> покриті металеві поверхні, біосумісні матеріали (деякі термопластичні та ароматичні полімери, боросилікатне скло та силікатне скло<sup>101</sup>) та полімери.

Вплив лазерного текстуровання поверхні (LST) на продуктивність механічних систем визначається різними такими параметрами, як умови експлуатації (навантаження, тиск, швидкість ковзання, температура), властивості мастила (у змащених контактах мастила з вищою в'язкістю посилюють ефект текстуровання LST<sup>37</sup>) та геометричні параметри текстури. Протягом останніх двох століть було опубліковано вражаючу кількість досліджень щодо LST, усі з яких були зосереджені на оптимізації текстури. Було виявлено, що геометричні характеристики, такі як форма, глибина, діаметр, поперечні розміри, співвідношення площ, тобто загальна площа ямки до загальної площі поверхні, відстань між ямками та співвідношення сторін, тобто глибина ямки до діаметра ямки, відіграють або вирішальну роль<sup>110,111</sup>, або просто не мають впливу<sup>112,113</sup> залежно від заздалегідь визначеного застосування та бажаної функціональності.

Однак, позитивний вплив текстурованих поверхонь на механічні характеристики контактів залежить від точності технології виробництва. З якісної точки зору, при виборі технології виробництва необхідно враховувати геометричні та металургійні характеристики, тобто шорсткість поверхні, точність геометрії, повторюваність та розведення, дефекти та зону термічного впливу відповідно.

Шорсткість поверхні між текстурами та всередині них є результатом техніки текстуровання та характеристик матеріалу підкладки. Хоча мікронерівності поверхні вважаються відповідальними за створення додаткової гідродинамічної підйомної сили,<sup>29</sup> при використанні текстурованих поверхонь потрібен кращий контроль шорсткості

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхні. Точніше, для забезпечення функціональності текстури необхідно контролювати шорсткість між мікроелементами поверхні та на їх дні/верху. На жаль, при використанні технології LST шорсткість вища всередині мікроелементів, тобто на дні та бічних стінках, порівняно з початковою шорсткістю підкладки (див. рисунки 5–8). Геніальним рішенням цієї проблеми є використання лазера як методу полірування, методу, який дозволяє значно зменшити шорсткість на дні текстур приблизно на 5%, як показано на рисунку 5.96,107. Техніка лазерного полірування передбачає обробку поверхні після текстурування.

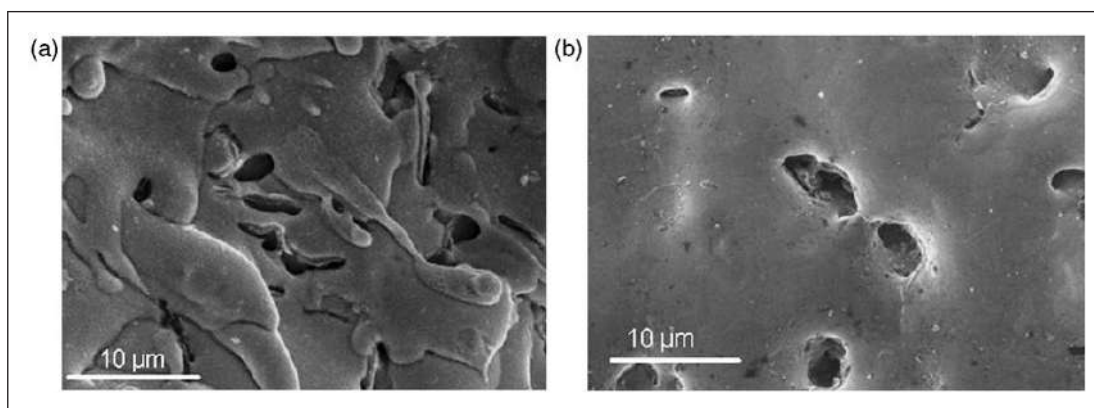


Рисунок 5. SEM-фотографія дна прямокутної канавки без лазерного полірування (а) та SEM-фотографія дна прямокутної канавки з лазерним поліруванням (зсув =+2 мм) (б).<sup>84</sup> Передруковано з Вінсента та ін.,<sup>107</sup> з дозволу Springer Science and Business Media.

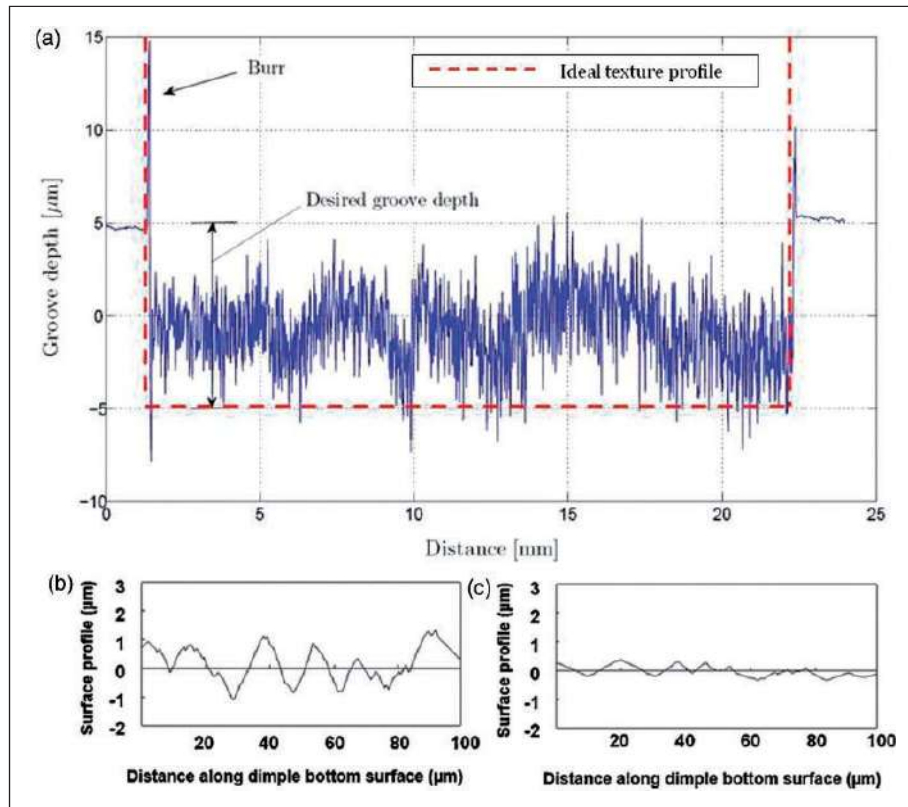


Рисунок 6. Вимірний профіль лазерно-гравірованої канавки. Вимірювання виконується в осьовому напрямку, вздовж осі зразка.(а).96 Передруковано з Огняновича,114 з дозволу Федеральної політехнічної школи Лозанни, Швейцарія. Профілі нижньої поверхні одного мікроотвору, отриманого на пружинній сталевій підкладці за допомогою двоетапного лазерного текстурування поверхні:90 шорсткість поверхні після першого кроку (b) та покращений профіль шорсткості після другого послідовного кроку (c).

процес за допомогою того ж лазерного променя зі зміщенням між фокальною площиною та поверхнею зразка, що дозволяє лише розплаву матеріалу підкладки уникнути його абляції. Завдяки відстані зміщення, яка коливається від 2 до 3,5 мм, енергія лазера менша. Шорсткість поверхні між текстурами також можна зменшити шляхом полірування або притирання після процесу текстурування.37

Також повідомлялося про зменшення шорсткості під час послідовного імпульсного опромінення підкладок (двоетапний метод LST) для різних матеріалів, таких як нікелевий сплав, пружинна сталь,105 та кремнієві

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підкладки з DLC-покриттям.32 Гао та ін.105 показали, що за допомогою двоетапного лазерного імпульсного методу нижня поверхня заглиблень згладжується, а середня шорсткість зменшується для обох матеріалів підкладок з пружинної сталі та нікелевого сплаву, як показано на рисунку 6(b) та (c).

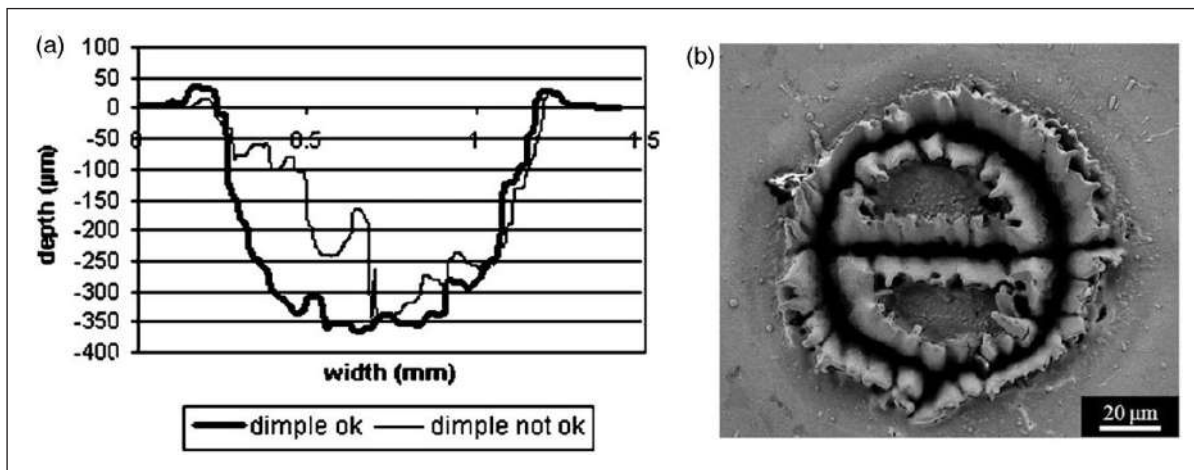


Рисунок 7. Профіль двох заглиблень ( $\varnothing$  1 мм, глибина: 500 лм) з безконтактними оптичними вимірюваннями (a).84 Передруковано з Вінсент та ін.,107 з дозволу Springer Science and Business Media. Приклад утворення опуклостей під час лазерного текстурування та їх знос після випробувань на зворотно-поступальне ковзання в режимі змащування для підкладки з міді (b).74

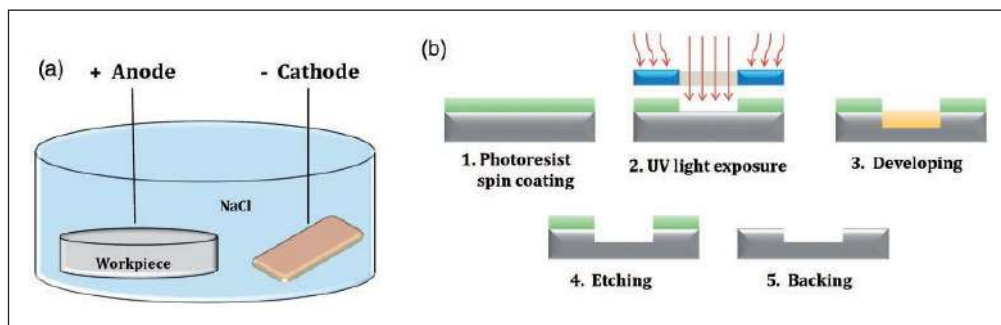


Рисунок 8. Фотолітографія з візерунком процес (a) та схематичне зображення процесу травлення (b).

Щодо точності геометрії та глибини, тобто прямих вертикальних стінок

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для квадратних або трикутних форм текстури, одним із рішень, що використовуються для досягнення вищої точності в лазерному текстуванні, є нахил променя під час процесу абляції. Промінь, який зазвичай розташований перпендикулярно до підкладки, може бути нахилений з максимальним кутом  $20^{\circ}$ .<sup>96,107</sup> Було показано, що використання цієї техніки покращує профіль текстури як для трикутного, так і для напівсферичного профілю текстури, зменшуючи мікросходинки на бічних сторонах мікроотворів (див. Рисунок 7). Іншим важливим аспектом LST є тепловий вплив лазерного променя на підкладку. Підкладка може зазнавати впливу тепла лазерного променя, і таким чином можуть відбуватися зміни її металургійних властивостей. Наприклад, коефіцієнт площі ЗТВ може досягати дуже високих значень, таких як 50–100% для коефіцієнта площі пор 14–22,5%, тоді як діаметр ЗТВ навколо заглиблень варіюється від 300 до 450 мм для кілець SiC.<sup>115</sup> Аналогічно, розмір зони термічного впливу, що оточує отвір діаметром 10 мм, індукований за допомогою імпульсів лазера Nd:YAG, може бути меншим за 10% від діаметра текстури. Поверхневі дефекти, такі як опуклості або задирки, являють собою ще одна проблема при використанні технології LST. Опуклості висота зазвичай значна (3,5–4,5 мм<sup>88,97</sup>) і може впливати на тертя. Для видалення цієї кількості матеріалу з текстурованої поверхні зазвичай використовується полірування, шліфування або притирання поверхні. Наприклад, необроблені лазерно текстуровані підкладки виявили підвищене тертя, що пояснюється зменшенням плівки. товщина поблизу заглиблень через наявність опуклостей навколо текстурних країв,<sup>37,38</sup> хоча зазвичай під час першого запуску в циклах змащеної або незмащеної системи ці структури пластично деформуються через контакт між сполученими поверхнями (як показано на рисунку 7(b)). Утворення брижів, тобто періодичних поверхневих структур, що збільшують шорсткість поверхні, також спостерігалось на fs та ps лазерно текстурованих підкладках, і це

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пояснювалося явищами інтерференції або поверхневими акустичними хвилями. Хоча контроль утворення брижів здається складним, ці структури були успішно використані для створення гідрофобних поверхонь на металевих підкладках.<sup>116</sup>

Зазвичай, процес лазерного текстурування вимагає дорогого обладнання, трудомісткої та дуже дорогої постобробки (програмування на ЧПУ є дорогим, особливо для циліндричних заготовок) та високої робочої енергії під час процесу текстурування. Однак, виробничі витрати суворо залежать від кількох параметрів: (i) системи текстурування (джерело лазера, керування переміщенням, фокусуюча лінза); (ii) матеріалу підкладки; (iii) розмірів текстури; та (iv) кількості заготовок, які необхідно обробити — створення прототипів або серійне виробництво (для великих обсягів оброблених деталей вартість може бути суттєво зменшена).

Електроерозійне текстурування (ЕДТ) являє собою ще один метод текстурування за високих температур. Цей процес полягає в ерозії металу як з електрода, так і з підкладки (заготовки, зануреної в діелектричну рідину) шляхом перетворення електричної енергії в теплову, що активується завдяки послідовним іскрам запалювання, ініційованим високою напругою на найменшому міжелектродному зазорі, тобто механізму термічного випаровування. Процес електроерозійної обробки (ЕДМ) може бути штампуванням (коли форма електрода повторюється як негативна форма на оброблюваній поверхні) та різанням дротом (коли металевий дріт, що використовується як електрод, слідує за заздалегідь визначеним шляхом для врізання в заготовку).<sup>117</sup> ЕДТ використовується для будь-яких електропровідних матеріалів (загартована сталь, карбід вольфраму, сплави) та непровідних матеріалів (кераміка).<sup>118,119</sup> Деякі з найважливіших переваг ЕДТ: (i) виготовлення складних геометрій з гострими кутами та внутрішніми кутами; (ii) розміри елементів менші за 100 мкм; (iii) низька шорсткість оброблених поверхонь (<100 нм); (iv) висока

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

точність (~1 мм); (v) відсутність механічного напруження заготовки (оскільки обертання під час процесу не потрібне).

Однак процедура має й свої обмеження: (i) низька швидкість видалення матеріалу (100 мм<sup>3</sup>/хв), отже, обмежений розмір заготовки; (ii) зона термічного впливу (HAZ) та «білий шар», як у випадку лазерного термічного обробки (LST), через високі робочі процеси (типова глибина ~50 мм); (iii) невеликі значення шорсткості можна отримати для триваліших періодів обробки.

На текстуровані поверхні, отримані методом електроерозійної обробки (EDT), впливає кілька параметрів: (i) ефективність різання визначається значенням коефіцієнта заповнення (відсоток тривалості імпульсу відносно загального часу циклу); (ii) краща обробка поверхні досягається за вищої частоти імпульсів; та (iii) відстань між електродами (збільшення відстані зі збільшенням струму розряду). Однак технологія електроерозійної обробки (EDM) успішно використовується для текстуровання валків прокатних станів<sup>120</sup> та різальних інструментів.<sup>121</sup> Процес мікроерозійної обробки базується на тому ж принципі, що й EDT: діелектрична рідина діє як ріжуче середовище, що забезпечує малі значення шорсткості та покращену стійкість до корозії та зносу. Мінімальне значення оброблюваного діаметра мікрострижнів становить близько 5 мм; тому він підходить для мікродеталей.

Заснована на тому ж принципі, тобто модифікації поверхні, активованої електричним розрядом, імпульсна повітряно-дугова обробка (РААТ) полягає в послідовних індукованих імпульсах високої напруги, які створюють електричну дугу між підкладкою та електродом (на відстані 0,2–0,5 мм).<sup>36</sup> Цей електричний місток локально нагріватиме та видалятиме матеріал, залишаючи мікроотвори з неправильні (певною мірою конічні) перерізи. На відміну від EDT, РААТ не вимагає використання діелектричної рідини, навіть якщо він залишається придатним для електропровідних матеріалів.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ще одним методом, що відповідає цій категорії, є електрохімічна обробка (ЕСМ). Цей метод подібний до EDT з деякими перевагами: інструмент для текстуровання не використовується під час процесу, а результати не пов'язані з будь-якими механічними чи термічними напруженнями, і його можна використовувати для текстуровання будь-якого твердого/м'якого матеріалу зі складною геометрією (включаючи внутрішні та зовнішні циліндричні поверхні). ЕСМ видається недорогим та дуже ефективним методом текстуровання для трибологічних застосувань.

Технологія сфокусованого іонного променя (FIB) передбачає використання сфокусованого іонного променя, що генерується рідкометалевим джерелом (зазвичай Ga<sup>+</sup>), який розподіляється по поверхні та дозволяє утворювати невеликі отвори в точних місцях. Незважаючи на те, що видалення матеріалу відбувається в результаті механічного впливу іонів на підкладку, FIB класифікується як високотемпературний процес через температури обробки, які можуть досягати 400 К. Температура обробки може здаватися низькою порівняно з іншими методами, представленими вище, для яких температура піднімається до 10 000–30 000 К, тобто EDT, LST, плазмовими технологіями, але вона все ще залишається суттєво високою порівняно з механічними методами або методами травлення. FIB може використовуватися для локального осадження та локального вилучення матеріалів з дуже високою роздільною здатністю (<100 нм).<sup>24</sup> Процес осадження полягає в розкладанні газу-попередника на леткі та нелеткі компоненти, які утворюють осад, шляхом сканування області променем. Однак FIB переважно використовується як метод видалення матеріалу; тому вона вважається частиною цієї групи технологій. Застосування FIB-обробки включає надточні ріжучі інструменти з (інструменти для мікроканалов та мікрорізьблення в сталі,<sup>123</sup> карбід вольфраму,<sup>123</sup> кристалічні алмази,<sup>123,124</sup> сапфір<sup>121</sup>), мікроелектрорезонатори,

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікроформи, припій для електронних пристроїв<sup>125</sup> та наноелектроди.

Ключові переваги полягають у: (i) високій роздільній здатності; (ii) відсутності обмежень щодо матеріалу підкладки; (iii) малій шорсткості поверхні, особливо коли для згладжування поверхні використовується FIB ( $R_q < 0,3$  нм було отримано на різних металевих сплавах<sup>121</sup>); (iv) діаметр плями іонного пучка, який надає текстурі поперечний розмір, може зменшуватися до 8 нм за малого струму (хоча малий струм означає довший час обробки). Незважаючи на це, FIB має повільну швидкість обробки, що обмежує його використання для деталей з малими розмірами. Очевидно, швидкість обробки можна збільшити, змінивши кут падіння пучка (до 60–80°) та додавши газ (фторид ксенону, йод, хлор) або водяну пару в реакційну камеру. Також повідомлялося про дефекти поверхні, такі як небажані брижові структури на підкладках, оброблених FIB.<sup>121</sup>

## 7. Технології травлення.

Однією з найбільш конкурентоспроможних та широко використовуваних технологій текстурування є хімічне травлення.

(ЕСТ) процес, під час якого видалення матеріалу відбувається внаслідок хімічних реакцій між реактивними речовинами та підкладкою (дія мікроскопічної електрохімічної комірки, подібна до корозії або хімічного розчинення металу<sup>126</sup>). Процес змінює топографію поверхні, але не змінює механічних властивостей підкладки.

Формування візерунка на підкладці може бути досягнуто за допомогою маскувального екрану або шляхом самоорганізації твердих частинок чи рідин для формування маски. Хімічне травлення зазвичай є частиною складніших процедур текстурування, таких як літографічні методи,<sup>127</sup> техніка реплікації,<sup>16</sup> та фотолітографія,<sup>126</sup> оскільки воно вимагає використання таких методів, як струменевий друк, тобто mCP, для нанесення маски на

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підкладку. Маскувальні екрани, виготовлені з фоторезистних плівок, можуть бути нанесені методом центрифугування або надруковані на підкладці. Хімічні реакції можуть бути активовані шляхом занурення заготовки в хімічний травитель (мокре травлення) або шляхом впливу на неї газоподібного середовища (сухе травлення).

Хімічне травлення забезпечує ефективний контроль видалення матеріалу. Мокре травлення може бути ізотропним (матеріал травиться з однаковою швидкістю в усіх напрямках) або анізотропним (швидкість травлення залежить від кристалічних площин); отже, можна отримати різні форми 3D-текстур. Реактивне іонне травлення (RIE),<sup>128</sup> плазмове травлення та газофазне травлення є найпоширенішими методами сухого травлення. Ще однією ключовою перевагою є те, що обробку можна застосовувати також до підкладок неправильної форми та складної геометрії. Швидкість процесу текстурування залежить як від методу друку (створення маски), так і від швидкості травлення, тоді як його точність безпосередньо залежить від методу, який використовується для створення маскувального екрану. За допомогою цього процесу можна текстурувати різні матеріали: мідь,<sup>23</sup> сталь,<sup>129</sup> нікель, кремній,<sup>16</sup> штампи з діоксиду кремнію,<sup>130</sup> та плівки DLC.<sup>34</sup>

Мокре травлення є низьковитратним методом, оскільки для травлення незахищених ділянок підкладки потрібні лише ванни з хімічними розчинами. Навпаки, методи сухого травлення вимагають використання дорогого обладнання (вакуумних камер) і є складнішими у виконанні.

Наприклад, Коста та Хатчінгс<sup>129</sup> використовували метод фотохімічного травлення для створення різних візерунків зі складними формами та розподілами на плоских сталевих поверхнях.<sup>129</sup> Цей метод передбачає використання фотолітографії для нанесення маскувального екрану на поверхню, а потім вологе хімічне травлення незахищених ділянок (деталь занурювали у 10% водну азотну кислоту), як показано на рисунку 8. Важливо зазначити, що маску можна формувати різними

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

методами, такими як самоорганізуюче хімічне травлення (на основі різниці в поверхневій енергії між різними компонентами), лазери,<sup>131</sup> краплі (пов'язані з гідрофобними та гідрофільними властивостями матеріалу підкладки, що дозволяють розташування крапель), а бульбашки можна використовувати для створення візерунчастих поверхонь без попередньо нанесеного маскувального екрану. В іншому дослідженні Обікава та ін.<sup>132</sup> використовували багатоетапний процес, що включає етап хімічного травлення, для створення різних візерунки на вставках з нікелевим покриттям (цементований карбід) для ріжучих інструментів. Вони спостерігали, що якість кінцевої текстури безпосередньо залежить від якості (покриття та товщини) шару фоторезисту. За допомогою експериментів з ортогональним різанням вони виявили, що точкові мікроструктури призвели до найбільшого зменшення тертя порівняно з іншими протестованими візерунками (перпендикулярні або паралельні лінії та ямки). Візерункові кремнієві пластини були створені за допомогою різних методів, що включають процес травлення: PVD-покриття - травлення для поверхонь ковзання з низьким тертям та техніку реплікації для створення зносостійких текстурованих інструментів для тиснення (DLC-покриття).<sup>16</sup>

Точність профілю часто залежить від якості фоторезистної маски, що використовується для процесу травлення. Метод хімічного травлення може бути використаний для створення широкого спектру текстурних форм, таких як безперервні та переривчасті канавки або нерівності з різною геометрією (прямокутні, круглі, трикутні, трапецієподібні тощо). Оздоблення поверхні, отримане методом хімічного травлення, зазвичай дуже хороше, що дозволяє створювати мікроелементи з гострими краями,<sup>132,133</sup> низькою шорсткістю поверхні<sup>129</sup> та точною геометрією.<sup>24</sup> Глибину текстури можна контролювати, змінюючи час травлення (довша дія кислоти призводить до більшої глибини елементів), метод дозволяє створювати глибини текстури між 0,5 мм та 1

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мм.133

Цей метод можна застосовувати як до плоских, так і до циліндричних підкладок<sup>21,133</sup> (внутрішні та зовнішні циліндричні грані). Лу та Хонсарі<sup>133</sup> провели порівняння між механічним та хімічним методами текстурування, показуючи, що хімічне травлення підходить навіть для внутрішньої поверхні втулки. Метод механічної обробки дозволив формувати круглі отвори із заокругленим дном, тоді як технологія травлення була успішно використана для отримання круглих та еліпсоїдних текстур з прямими вертикальними стінками.

Деякі дефекти геометрії текстури були описані Огняновичем<sup>114</sup>, який провів порівняння різних методів, таких як LST, EDM та травлення, як потенційних методів текстурування для застосувань з підшипниками «ялінка». Як показано на рисунку 9(a), профіль травленої текстури (розріз) має центральну область з меншою глибиною та бічні області з більшою глибиною. Вважається, що це пов'язано з недостатньою циркуляцією травильного агента в травильній ванні, і це можна виправити, покращивши його циркуляцію. Однак, порівняно з текстурними профілями LST (див. рисунок 5(a)) та EDM (рисунок 9(b)), хімічне травлення зменшує нерівності та шорсткість в мікроотворах.

Менш дорогим методом отримання поверхневих візерунків є метод безмаскового хімічного травлення (МЕСТ). Метод, запропонований Костою та Хатчінгсом,<sup>134</sup> передбачає використання перфорованого маскового інструменту (ізоляційного катода), який локалізує дію травлення на певних ділянках заготовки (анода), як показано на рисунку 10(a). Електроліт виходить через отвори, перфоровані в масці, а потім витікає.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

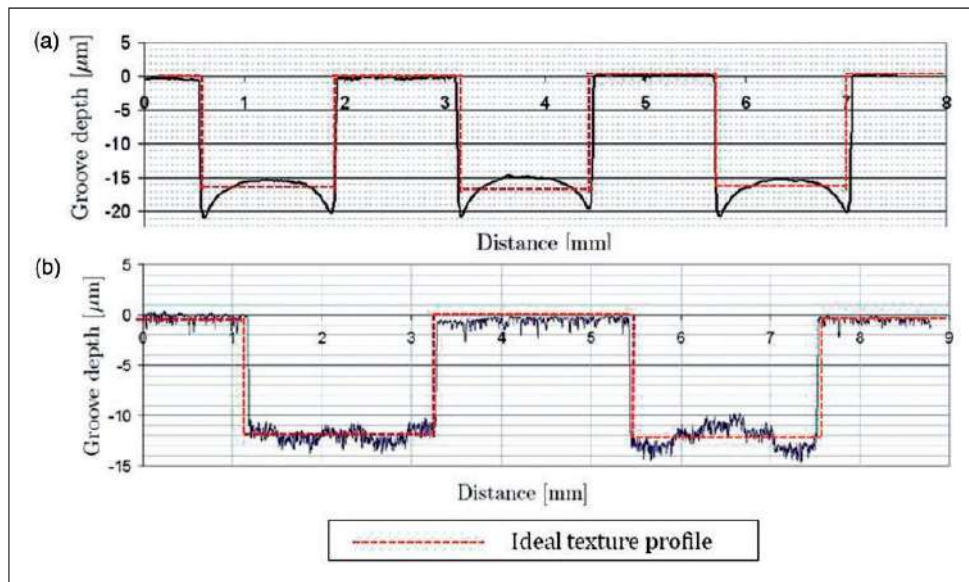


Рисунок 9. Порівняння результатів вимірювання профілю канавки, отриманого за допомогою електрохімічного травлення на циліндричному зразку (а), та результатів вимірювання профілю канавки, отриманого за допомогою електроерозійної обробки на плоскому зразку (б).<sup>96</sup> Передруковано з Огняновича,<sup>1143</sup> дозволу Федеральної політехнічної школи Лозанни, Швейцарія. Червона лінія позначає ідеальний профіль текстури через тонкий зазор між робочою деталлю та текстурованою підкладкою. Низька вартість та висока ефективність МЕСТ зумовлені тим, що інструмент з однією маскою може бути використаний для послідовного текстурування кількох заготовок (розчинення матеріалу на катоді не відбувається, отже, інструмент не пошкоджується, як у випадку ЕСТ), маскування кожної заготовки не потрібне, а процедура дозволяє текстурувати більші площі та створювати кілька текстур на одній поверхні одночасно.

Метод був успішно використаний (ефективність понад 90%) для створення візерунків на зразках вуглецевої сталі. Елементи, створені Костою та Хатчінгсом<sup>134</sup>, являли собою круглі кишені шириною 120–150 мм та глибиною 0,6–45 мм. Однорідні текстури можна створювати за достатньо високих швидкостей потоку електроліту, що також забезпечує транспортування протравлених елементів з робочої зони. Короткий час імпульсу призводить до підвищення точності, але до збільшення часу обробки. Складні геометричні елементи, такі як циліндричні отвори,

паралельні канали, перервані циліндричними отворами, та шеврони, були створені на сталі Чо та Парком15 (Рисунок 10(b) та (c)). МЕСТ здається дуже швидким та економічно ефективним методом текстурування, з можливим застосуванням у промисловому виробництві. Час створення візерунків достатньо короткий — час обробки коливається від 20 до 180 с для площі поверхні  $35 \times 35 \times 2$  мм<sup>3</sup>, і метод може бути успішно використаний для створення складних елементів. Травлення може бути нанесено на чітко визначену ділянку заготовки без забруднення непротравленої зони. Однак ця техніка має свої обмеження: (i) вона здається придатною лише для плоских поверхонь (хоча інструмент-маска може бути адаптований для більш складних геометрій); (ii) глибина кишень може збільшуватися зі збільшенням часу обробки; однак це призводить до зниження геометричної точності.

Методи, засновані на механічному видаленні. Категорія технологій видалення матеріалу, що використовуються для текстурування, базується на механічній дії, яка витягує матеріал підкладки з потрібних ділянок. Методи механічного текстурування часто переважають над методами високої температури через зменшення термічного пошкодження під час обробки.<sup>135,136</sup>

Ультразвукова обробка на верстатах з ЧПК (CNC-UM) базується на видаленні матеріалу внаслідок механічного впливу між підкладкою та мікроабразивними частинками з дуже високою швидкістю, що викликається вертикальним вібраційним ріжучим інструментом. Видалені частинки матеріалу виштовхуються із зони обробки завдяки циркуляції води, що також знижує температуру (див. Рисунок 11(a)). Цей процес може бути використаний для отримання різних форм текстури (прямокутної, круглої, напівсферичної) з високою точністю та різними розмірами (ширина від 50 мм до кількох міліметрів та глибина 1–10 мм). Так само він застосовний до різних матеріалів-підкладок, таких як скло, композити, кварц тощо. Друга конРисунокція передбачає

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обертання та вібрацію інструменту під час обробки, тобто ротаційна ультразвукова обробка (CNC-RUM), метод, який забезпечує чудову якість поверхні, підвищену точність текстури та значне скорочення часу обробки порівняно з CNC-UM (Рисунок 11(b)). Крім того, використання абразивних частинок більше не потрібне.

Обидві технології можна використовувати для виробництва дуже малі елементи — глибина 0,1 мм, діаметр 5 мм.<sup>136</sup> Основними недоліками є обмеження, що накладаються вибором матеріалів (оскільки дуже тверді матеріали неможливо текстурувати через пошкодження мікросвердла) та розмірами текстури, які безпосередньо залежать від розмірів мікросвердла (найменша створена особливість ~125 мкм<sup>14</sup>). Більше того, при текстуруванні складних 3D-поверхонь використовується складний та дорогий 5-осьовий ЧПК-верстат

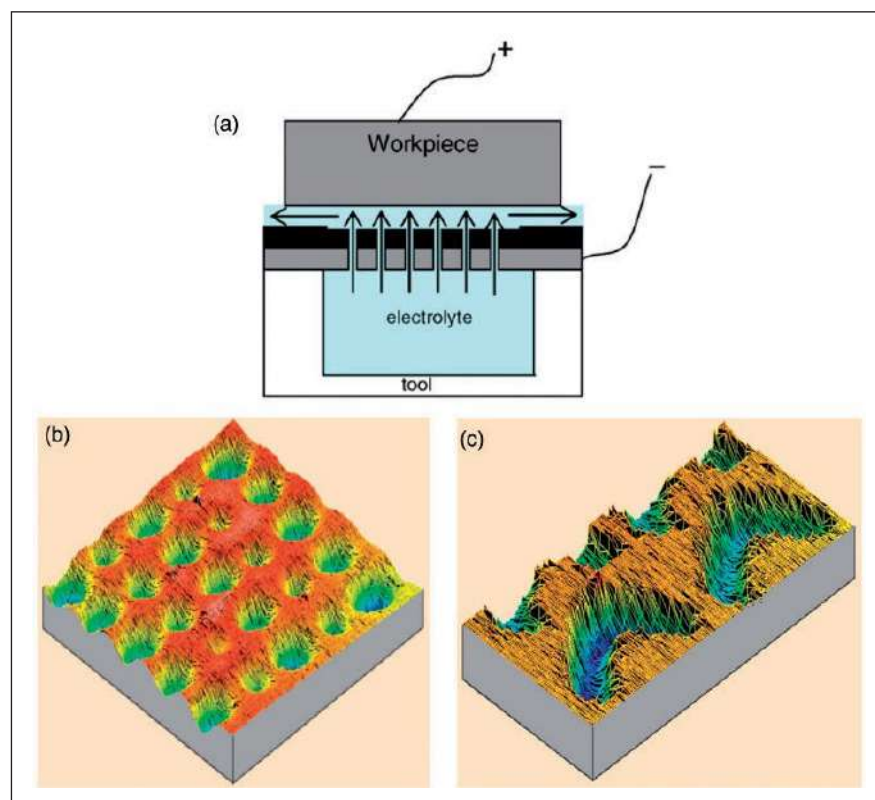


Рисунок 10. Принцип МЕСТ (а).<sup>116</sup> Передруковано з Costa and Hutchings,<sup>134</sup> з дозволу Elsevier. Отримані текстури поверхні а плоских сталевих поверхнях: круглі (b) та шевронні отвори (c)..

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

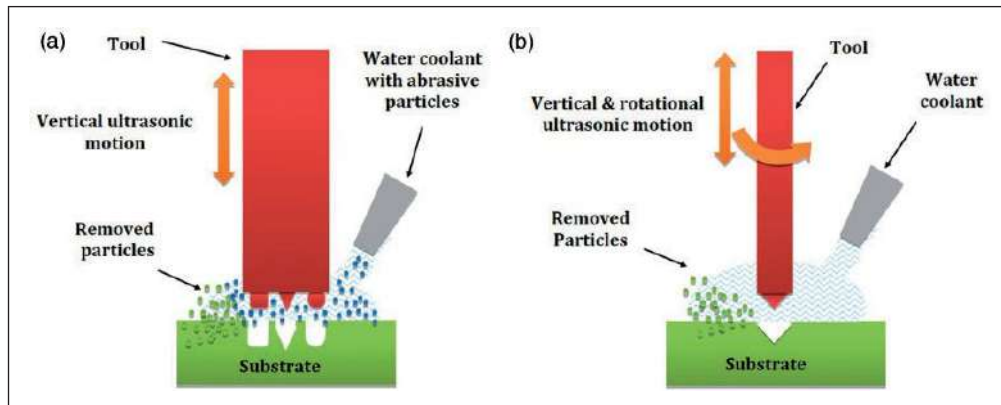


Рисунок 11. Схематичне зображення ультразвукової обробки на ЧПК (а) та ротаційної ультразвукової обробки (б) потрібна система керування. Однак RUM рекомендується для твердих і крихких матеріалів, таких як кераміка та титанові сплави, через зниження витрат у порівнянні з лазерним текстуруванням або електроерозійною обробкою.

Ще однією технікою мікрорізання з ЧПК-контролем є вібромеханічний метод текстурування (ВМТ): мікрорізальний інструмент з індукованим коливальним рухом розміщується на нерухомій опорі, а обробка поверхні базується на токарній операції текстурованої заготовки. Цей метод може бути використаний для створення візерунків на внутрішніх або зовнішніх поверхнях циліндричних заготовок (валів, стрижнів), а також на плоских поверхнях. Параметри текстури контролюються за допомогою нав'язаної вібрації інструменту: частота — відстань між кишнями, амплітуда — глибина текстури, форма хвилі — геометрія текстури. Розмір мікроелементів, створених технікою ВМТ, обмежений глибиною 2–50 мм, діаметром пор 100–500 мм та окружним діаметром 50 мм (також можна обробляти безперервні канавки).<sup>138,139</sup>

Хонінгування, шліфування та полірування зазвичай використовуються у виробництві автомобільних компонентів для покращення властивостей поверхні: згладжування; зменшення шорсткості, посилення верхнього

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шару основи, видалення морфологічних дефектів, домішок та

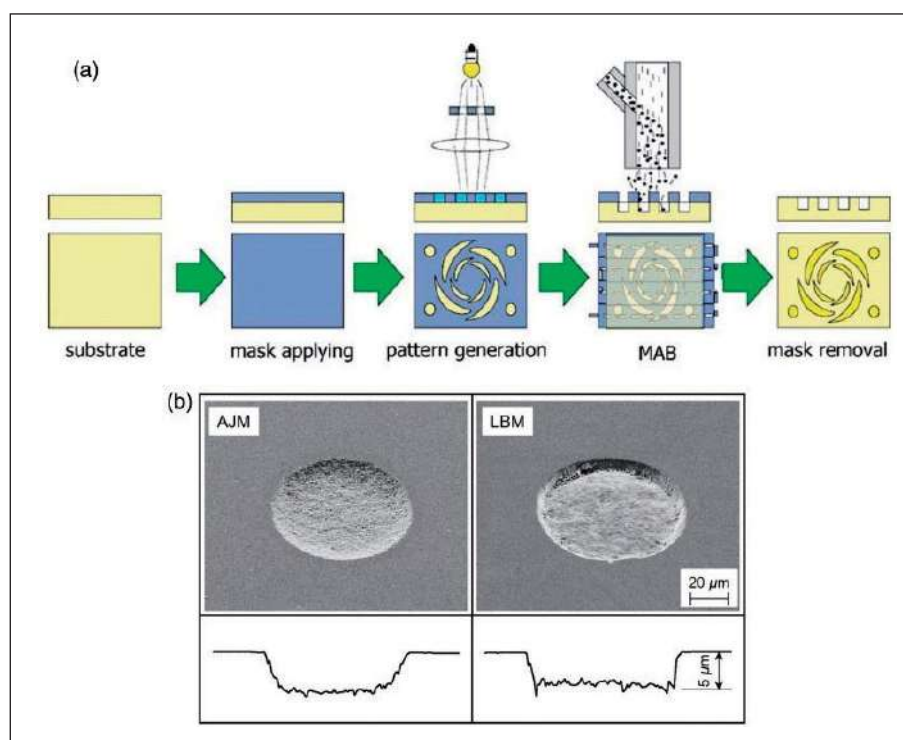


Рисунок 12. Генерація текстури за допомогою техніки візерунчастої ерозії (а).<sup>106</sup> Передруковано з Achtsnick et al.,<sup>123</sup> з дозволуElsevier. Мікроотвори, отримані методом візерунчастої ерозії (AJM) та лазерного текстурування (LBM) на підкладках з нітриду кремнію (b).

Обидві технології можна вважати доступними та недорогими порівняно з усіма іншими методами текстурування, представленими в цій статті.

Метод шліфування базується на механічному абразивному обробленні.активна дія шліфувального інструменту або круга, покритого мікрочастинками різання (з мікрометричною точністю). Його можна використовувати для обробки поверхні твердих і дуже твердих матеріалів з тонким покриттям і точними геометричними розмірами.<sup>140,141</sup>

Процес хонінгування базується на точному абразивному впливі інструменту на основу за заздалегідь визначеною траєкторією. Верстат може використовувати один або декілька абразивних каменів, що дозволяє

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

створювати різноманітні візерунки. Цей процес використовується для покращення текстури та геометрії поверхні. Зазвичай він застосовується для обробки поверхонь циліндрів (для двигунів внутрішнього згорання), повітряних підшипників та шестерень.<sup>3,142</sup>

Процес візерунчастої ерозії (рис. 12(а)) полягає в абразивній дії потоку частинок, що проектується на підкладку під високим тиском.<sup>123</sup> Процес використовується для зміни шорсткості поверхні (її збільшення або зменшення), створення різних форм або видалення нерівностей чи домішок. Метод може використовувати різні процеси: дробоструминну обробку, піскоструминну обробку, дробоструминну обробку або содову обробку. При використанні для створення мікрогеометрії ця техніка передбачає використання малих сопел (діаметром 0,25–1,5 мм) для подачі потоку дрібних частинок (повітря або інертних газів) на підкладку (суха абразивна обробка). При контакті з підкладкою абразивні частинки видаляють матеріал підкладки, створюючи мікроотвори на чітко визначене місце (оброблена поверхня може коливатися від 1 мм<sup>2</sup> до кількох см<sup>2</sup>). Процес можна класифікувати як метод видалення матеріалу або метод витіснення матеріалу, оскільки він може включати як руйнування підкладки, так і пластичну деформацію.

Чим менші розміри абразивних частинок, що використовуються в процесі, тим вищий тиск, необхідний для транспортування частинок та інтенсивності струменя (оскільки швидкість частинок може сягати 300 м/с).<sup>123</sup> Візерунок формується завдяки захисній масці, нанесеній на підкладку, зазвичай фоторезисту, нанесеного методом центрифугування, та нанесеного за допомогою фотолітографії. Цей метод успішно застосовується для текстурування різних матеріалів: сталі, Cu, Zn,<sup>123</sup> нітриду кремнію,<sup>112</sup> скла,<sup>143</sup> та хромованої сталі.<sup>144</sup>

Наприклад, Вакуда та ін.<sup>112</sup> порівняли візерунчасту ерозію та лазерну обробку як методи текстурування, використовуючи як підкладки керамічні пластини з нітриду кремнію. Як видно на рисунку 12(б),

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

техніка дробоструминної обробки призводить до формування закруглених профілів у порівнянні з технікою лазерного текстурування. Однак автори повідомили, що текстурний профіль має незначний або взагалі не впливає на покращення фрикційних властивостей візерунчастих поверхонь у випробуваннях на зворотно-поступальне ковзання (змащення). Сліккервір та Інт Вельд143 отримали складні структури (мікроколонки) та гострі кути (внутрішні та зовнішні кути) за допомогою кількох потоків та різних кутів нахилу напрямних сопел. Потік частинок концентрує механізм ерозії в центрі текстуруваної області, але формування плоского дна текстури може бути досягнуто дуже малими

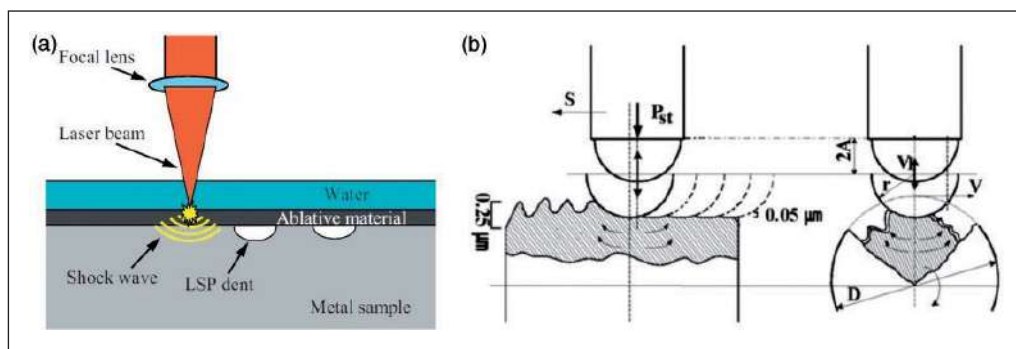


Рисунок 13. Схематичне зображення процесу лазерного ударного зміцнення (а). Під час тестування різних матеріалів захисних масок, Ахтснік та ін.123 виявили, що візерунчаста ерозія, здається, збільшує твердість поверхні (за Віккерсом) металів, але також збільшує шорсткість. Вони зазначили, що захисна маска впливає як на швидкість ерозії, так і на якість обробки поверхні, тому її слід ретельно підбирати. В іншому дослідженні Де Мелло та ін. порівняли різні процедури текстурування, що використовуються на сталі для прокату (що використовується в техніці холодної прокатки): дробоструминна обробка (Т), хромування (С), комбіноване дробоструминне очищення (без візерунка) з подальшим хромуванням (ТС) та комбіноване хромування з подальшим дробоструминним очищенням (СТ). Вони зазначили наступне: (і) методи

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

С та СТ збільшують твердість поверхні більше, ніж прості методи текстурування; коефіцієнт тертя не залежить від методу текстурування; (ii) текстурування поверхні збільшує знос контртіла у випробуваннях на сухе ковзання, тоді як тверде хромове покриття зменшує його; (iii) процес хромування збільшує стійкість до мікроабразії, ймовірно, через значну твердість хрому; та (iv) текстурування зменшує явища мікроабразивної стійкості, пов'язані з поверхневим зміцненням під час процедури текстурування.<sup>144</sup>

### 8. Методи заміщення матеріалів

Механічно індуквані переміщення матеріалу. Тиснення. Метод може використовувати індендор односторонньої форми, візерунковий інструмент або візерунковий ролик (у цьому випадку це називається вібровальцюванням), механізм формування структури базується на перенесенні форми інструменту на поверхню заготовки шляхом пластичної деформації. Інструменти для вдавлення зазвичай покриваються тонким шаром твердого та дуже абразивного матеріалу (наприклад, алмазного порошку) та вдавлюються в підкладку. Петтерссон та Якобсон використовували цей метод для створення візерункових кулькових підшипників, сталевих кульок, плоских підкладок або візерункових роликів, щоб дослідити вплив текстури на трибологічні характеристики ковзних контактів. Їхні результати показують, що цей метод з гарною точністю відтворює форму інструменту на підкладці, і його можна використовувати для створення різних текстурних форм з гарною роздільною здатністю.<sup>146</sup>

Аналогічно, простий індендор також може бути використаний для створення мікроб'ятин на поверхні ролика, що призводить до текстур різних розмірів та розташування, з точною геометрією та гарною повторюваністю.<sup>147</sup>

Техніка вібровальцювання використовується для створення регулярних текстурних візерунків на поверхні шляхом пластичної деформації основи, а

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

не різання, як у випадку полірування, шліфування та хонінгування. Пластична деформація відбувається, коли межа текучості матеріалу менша за контактне напруження, що створюється поверхнею інструменту. Її можна використовувати для створення різних візерунків на циліндричних поверхнях, плоских поверхнях та інших складних геометріях, і вона є кращою за методи точіння, шліфування та полірування, покращуючи стійкість до фреттингу та зносу металевих поверхонь.<sup>148,149</sup>

Ще однією технікою обробки поверхні, що входить до цієї категорії, є витравлювання. Цей метод може бути використаний для зменшення шорсткості (подібно до полірування або притирання), але його також можна використовувати для створення специфічних візерунків на втулках підшипників ковзання (ексцентричне витравлювання), що покращує змащування та тертя. Цей метод підходить для текстурування плоских та циліндричних поверхонь, як показано Кожелою та ін.<sup>150,151</sup>. Коржинський<sup>152</sup> порівняв візерункові втулки, створені за допомогою алмазного точення та ексцентрикового витравлювання. Трибологічні випробування (випробування на ковзання зі змащенням з геометрією пари штифтів та підшипникових майданчиків) показали, що витравлені поверхні мають менші втрати зносу (до 84%) порівняно з втулками, обробленими алмазним точенням. Подібно до хонінгування та шліфування, витравлювання є недорогим методом виробництва.

Технологія лазерного ударного зміцнення (LSP) – це чисто механічний процес, заснований на пластичній деформації підкладки внаслідок лазерної ударної хвилі без теплового впливу.<sup>153–155</sup> Заглиблення створюються на металевих поверхнях шляхом пластичної деформації. Підкладка захищена від тепла за допомогою попередньо нанесеного непрозорого шару (див. Рисунок 13(а)). Прозорий верхній шар (скло або водяна плівка) використовується для утримання (захоплення) пари та плазми (створених розплавленим непрозорим шаром) на поверхні підкладки, створюючи дуже високий тиск завдяки поглинанню енергії

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лазера.

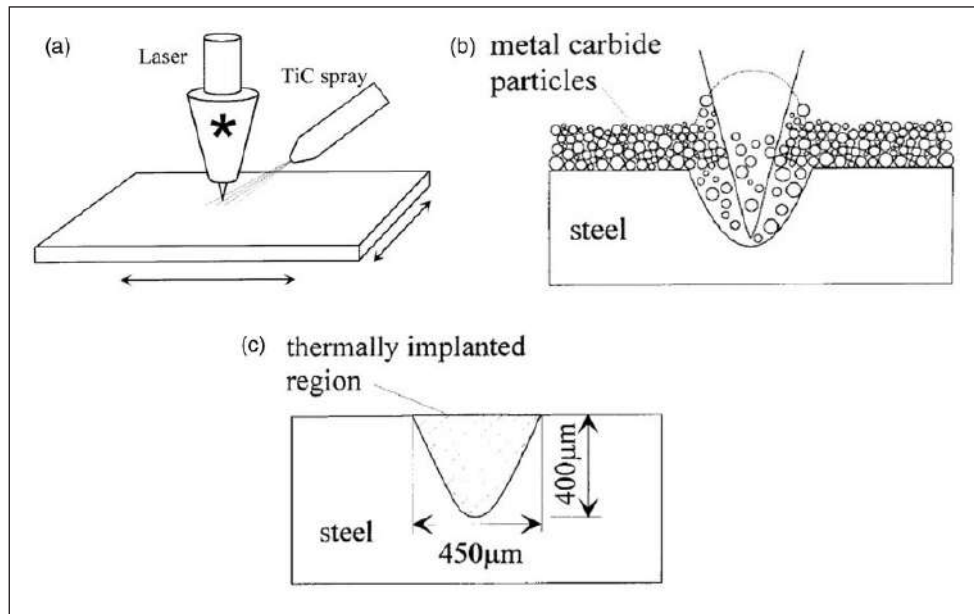


Рисунок 14. Процес термічної імплантації металевих підкладок.<sup>140</sup>  
Передруковано з Fletcher et al.,<sup>166</sup> з дозволу SAGEВидавництво ТОВ

енергія (інтенсивність у кілька ГПа). Коли тиск ударної хвилі перевищує динамічну границю текучості підкладки, утворюються мікроотвори.

Цей метод може викликати глибокі залишкові напруження в підкладці, що може покращити опір втомі, і він успішно використовується для створення заглиблень на підкладках з алюмінієвих сплавів, міді, сталі та титанових сплавів. Глибина елементів залежить від твердості та еластичних властивостей підкладки, тобто підвищена твердість підкладки призводить до менш глибоких елементів. Збільшення потужності лазера та кількості послідовних імпульсів також може збільшити глибину та діаметр заглиблень. Інформація про трибологічні властивості такої текстурованої підкладки ще відсутня в літературі, але їх можна порівняти з лазерно текстурованими.<sup>155</sup> Однак ця техніка збільшує твердість поверхні (до 15% у центрі заглиблень) завдяки деформаційному зміцненню та залишковим напруженням стиску.<sup>154</sup>

Порівняно з традиційними методами дробоструминного зміцнення (з

використанням круглих твердих частинок для створення деформації<sup>156–159</sup>), цей метод є дорогим, оскільки вимагає використання лазерного джерела, а його вартість сягає кількох сотень тисяч євро.<sup>153</sup>

Ультразвукова нанокристалічна модифікація поверхні (UNSM) використовується для покращення стійкості до втоми та стирання різних металів та сплавів (Al, сталь, Cu, Ti тощо).<sup>97,160,161</sup> Метод базується на генерації імпульсів ультразвукової частоти, що використовуються для активації необхідної сили для удару мікрорізального інструменту (штифта або кульки діаметром 1–10 мм) об основу (20 000–40 000 ударів мм<sup>2</sup>), що призводить до утворення дуже великої кількості заглиблень (малої глибини 0,1 мм), пластичної деформації та утворення нанокристалічних структур (див. рисунок 13(b)).<sup>97</sup> Оскільки матеріал видаляється шляхом пластичної деформації, утворюються опуклості.

утворення спостерігається навколо країв заглиблень внаслідок пластичного плину.

Хімічно-індуковане зміщення матеріалу. Текстурування мета-Відомості, що належать до цієї підкатегорії, базуються на хімічно індукованому зміщенні речовини, такому як молекулярна міграція та утворення зморшок на поверхні. Механізм молекулярної міграції може бути використаний для створення нанотекстур на підкладках, покритих полімерними плівками на основі азобензину. Метод базується на міграції полімерного ланцюга внаслідок рухів, індукованих фотоопроміненням лазерного променя. Текстури з глибиною та шириною від десятків нанометрів до майже 500 нм вже були створені різними авторами.<sup>162,163</sup> Поверхневі зморшки, тобто нано- та мікрохвильовості, можуть бути отримані за допомогою різних багатоетапних процесів. Перший метод - це окислення підкладок PDMS плазмовим окисленням або УФ-озоном для створення жорсткого шару кремнезему на поверхні підкладки, після чого відбувається термічно або

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

механічно індуковане розтягування або стиснення підкладки. Утворення зморшок також спостерігалось під час випаровування металу на підкладках PDMS, що піддаються впливу УФ-світла через візерункчасті маски. Інший метод зморщування полягає в початковому процесі покриття (центробіжне покриття, напилення) підкладки з використанням полімерних плівок, що тверднуть, з подальшим механічно індукованим стисканням або розтягуванням підкладки.<sup>164</sup> Ці методи дозволяють формувати неупорядковані хвилясті структури та односпрямовані хвилясті утворення (внаслідок одноосьового крохмалення або стиснення) з розмірами від десятків нанометрів до кількох мікрометрів. Так само використання попередньо нанесених візерунків підкладок дозволяє формувати складні візерунки з контрольованою формою та орієнтацією.<sup>165</sup>

Мікромеханічні системи, а також мікрозмащені контакти представляють собою потенційне застосування

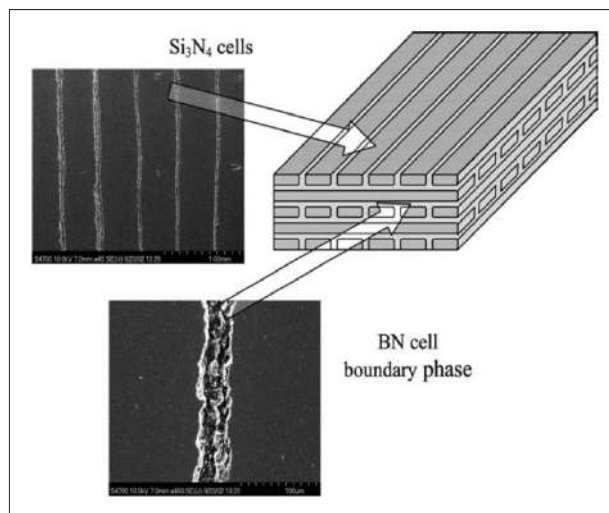


Рисунок 15. SEM-фотографії поверхні FM та схематична діаграма зразка FM з перехресним шаром.<sup>141</sup> Передруковано з Gutierrez-Mora et al.,<sup>167</sup> з дозволу для цих технологій, тобто методу рельєфної решітки поверхні та методу зморщування поверхні, особливо для ситуацій, коли потрібен контроль змочуваності. Однак основними обмеженнями для обох технологій текстурування є матеріали підкладки, які зазвичай не використовуються

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в трибологічних системах (наприклад, полімери на основі азобензину, PDMS та кремнезем), а також крихкість текстури, поверхневі тріщини та дефекти, про які іноді повідомлялося.

Автоматичне формування текстури (імплантація твердої та м'якої фаз). Термічна імплантація (рис. 14) базується на імплантації твердих, зносостійких ділянок у підкладку, завдяки чому під час використання підкладки (менш стійка) зношується, а з твердих імпантованих фаз утворюється візерунок (які можуть витримувати вищий контактний тиск).

Термічна імплантація TiC у сталеву підкладку показала 100% збільшення твердості.<sup>166</sup> Цей метод базується на тому факті, що під час використання відбувається передача навантаження між підкладкою та імпантатами (після зносу матеріалу підкладки), і тому знос підкладки зменшується. Підкладка повинна відповідати деяким вимогам: (i) висота текстур не повинна перевищувати критичного значення, щоб уникнути локалізованого контактного тиску; (ii) висота імпантату повинна бути достатньою, щоб дозволити утримувати сміття та мастило після формування текстури; (iii) механізм формування текстури базується на зносі внаслідок локалізованого контактного навантаження; однак формування структури має бути нечутливим до випадкових перевантажень; (iv) незначні відмінності між початковою висотою, діаметром або формою структури не повинні впливати на процес формування, а також на розподіл навантаження чи знос (оскільки невеликі відмінності завжди будуть присутні через процес термічної імплантації, який неможливо повністю контролювати).

Ця технологія призводить до дуже гарної якості оброблених поверхонь з невеликою шорсткістю як для імпантатів, так і для підкладки. Середня шорсткість підкладки завжди вища, ніж шорсткість імпантатів, і збільшується з часом роботи (збільшення Ra від ~54 до ~60 нм), тоді як

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шорсткість імплантатів має протилежну поведінку (зменшення Ra від ~15 до ~7 нм). Трибологічні випробування показали покращену поведінку в змащеному контакті кочення двох дисків.166

Іншим методом є вбудовування м'яких фаз. Волокнисті моноліти (FM) Si<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub>/H-BN були виготовлені цим методом Гутьєрресом-Морою та ін.167. Формування таких структур передбачає багатоетапний процес: односпрямовані наповнювачі Si<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub> укладаються в листи, які потім складаються та пресуються для отримання односпрямованих та перехресно-шарових зразків; зразки пресуються для формування зелених панелей; зелені панелі використовуються для формування щільних FM-структур шляхом піролізу сполучної речовини в потоці N<sub>2</sub> з подальшим гарячим пресуванням. Структура, що містить комірки Si<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub> та безперервну межу H-BN, представлена на рисунку 15. Така структура може зменшити тертя та знос у змащених умовах (випробування куля на плоскій поверхні); однак цей ефект залежить від поверхні пари, яка використовується для випробування.

## 9. Самоадаптивні функціональні поверхні.

Протягом останніх кількох років розвиток методів текстурування призвів до кращого контролю та розуміння фізичних явищ, що визначають ефект текстурування в механічних застосуваннях. Контроль контакту рідина-тверда речовина-пара є важливим у багатьох повсякденних та промислових застосуваннях, і його можна досягти для підкладок.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

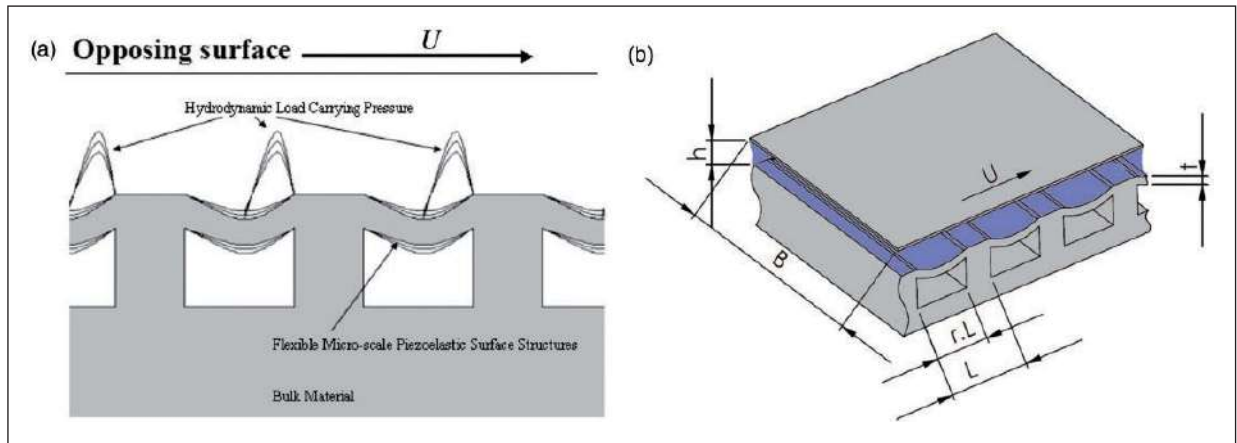


Рисунок 16. Самоадаптивна текстура поверхні, запропонована Коннором<sup>142</sup>, Сліккервіром та Інт Вельдом.<sup>143</sup> Передруковано з Duvvuru et al.,<sup>168</sup> з дозвіл Тейлор & Франциск Група. Передруковано з Фесангарі і Хонсарі, <sup>169</sup> з дозвіл з Тейлор & Франциск Група.

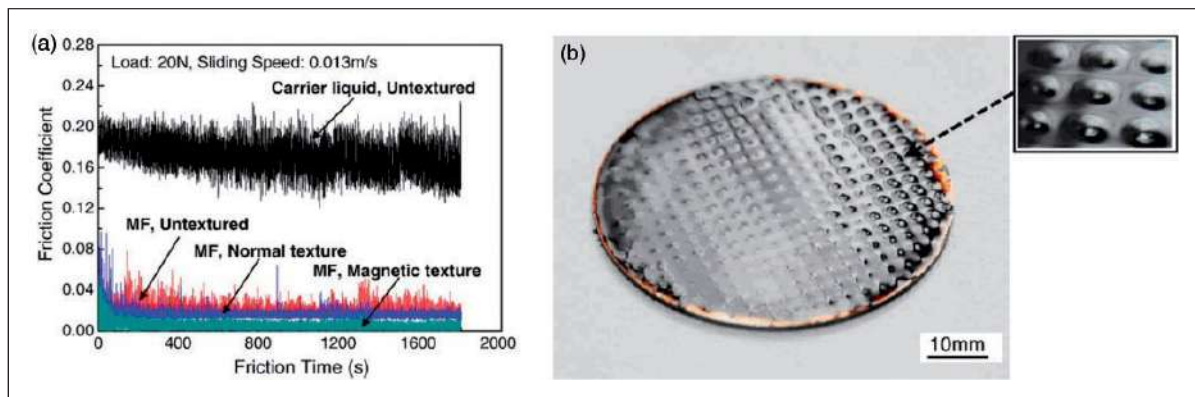


Рисунок 17. Вплив самоадаптивної магнітної текстури на коефіцієнт тертя та зношування, отриманий під час випробування штифт-на-диску (а) та автоформування текстури внаслідок початкового намагнічування плівки (б).

Окрім очевидної конкуренції за мініатюризацію, яка призводить до розвитку виробничих технологій, здатних проектувати елементи мікро- або нанометричного розміру, новою привабливою тенденцією є використання самоадаптивних текстур, здатних підлаштовуватися під умови експлуатації для забезпечення бажаних функцій.

Таку функціональну поверхню запропонували Дуввур та ін.<sup>168</sup>, а також

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фесангарі та Хонсарі.<sup>169</sup> Вони пропонують самоадаптивну текстуру поверхні, здатну деформуватися під високим тиском, щоб витримувати вищі навантаження при заданій товщині плівки (Рисунок 16). Поведінку цих еластичних текстур досліджували лише чисельно, і були вказані деякі важливі параметри проектування: товщина фольги повинна мати обмежену товщину, щоб дозволити деформацію, а її значення залежить від співвідношення ширини/довжини підкладки. Співвідношення довжини текстури в діапазоні  $\sim 0,36-0,44$  призводить до вищих значень тиску. Було показано, що ця самоадаптивна текстура покращує несучу здатність порівняно з аналогічною жорсткою текстурою.

Цей тип поверхні був експериментально виготовлений Дувуру та ін. за допомогою техніки мікроліття PDMS.<sup>168</sup> Однак, брак інформації про її трибологічну поведінку ускладнює розгляд її застосування в реальних механічних застосуваннях.

Візерунчасті магнітні плівки, сформовані за допомогою двоетапного процесу, що полягає в мікро-ЕСМ з подальшим гальванічним покриттям, також належать до цієї категорії (Рисунок 17). Після намагнічування постійними магнітами візерунчасті плівки, що контактують з магнітними рідинами, утворюють самоадаптивну текстуру, яка зменшує тертя та знос між паралельними контактними поверхнями, як показано Вангом та ін.<sup>113</sup> та Шеном та ін.<sup>170</sup>.

Іншим прикладом самоадаптивної текстури є функціональні підкладки, покриті магнітно керованими мікроцвяхами, отриманими шляхом електроосадження та електрохімічного синтезу нікелю на золотій підкладці. За відсутності магнітного поля ця поверхня проявляє супергідрофобні та суперолеофобні властивості завдяки нависаючим сферичним шапкам, що призводять до додаткової капілярної сили, що запобігає змочуванню.<sup>147</sup>

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

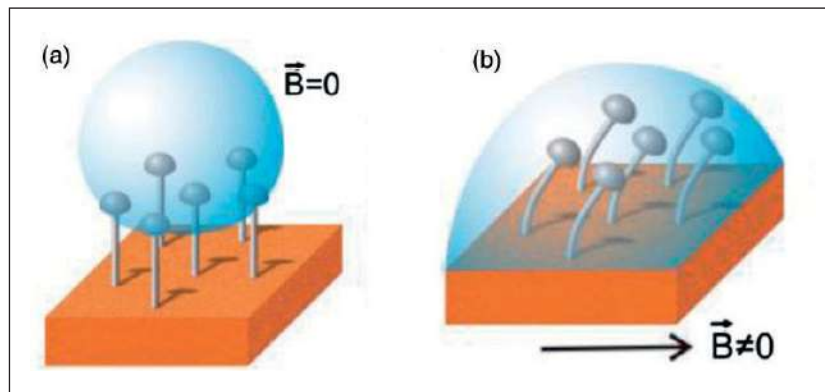


Рисунок 18. Самоадаптивна функціональна поверхня з магнітно-індукованими змочувальними властивостями: незмочувана поверхня, покрита нікелевими мікроцвяхами (а), стає ліофільною у присутності магнітного поля через вигин мікроцвяхів (b).

У присутності магнітного поля вертикальні мікронігті згинаються, змінюючи рівноважний кут контакту та призводячи до ідеально ліофільного субстрату (див. Рисунок 18). Ці типи структур мають великий потенціал для таких застосувань, як розділення олії та води, транспортування та мікрофлюїдика, але вони також можуть знайти своє місце в змащених контактах, таких як системи герметизації, де потрібен суворий контроль динаміки потоку.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновки

У цій магістерській роботі детально описано та класифіковано технології виробництва, що використовуються для створення текстурованих поверхонь для трибологічних застосувань. Також описано основні переваги та недоліки інженерних методів, а також найпоширеніші проблеми щодо якості текстур. Функціональні характеристики текстурованих підкладок, а також їх загальні потенційні застосування були коротко розглянуті, оскільки вони не є основною темою цієї статті.

Час від часу, через сучасні технічні обмеження, використання однієї технології виробництва не може забезпечити бажану якість текстури. Як показано в цій статті, одним із рішень може бути поєднання різних методів текстурування. Таким чином, можна досягти деяких покращень з точки зору точності, часу виготовлення, витрат тощо.

Важливо зазначити, що для певного застосування технологія виробництва повинна бути обрана з розумом, щоб задовольнити економічну ефективність та геометричні параметри текстури. Кожна обрана технологія повинна відповідати деяким мінімальним критеріям: сумісність з геометричною формою та розмірами оброблюваних заготовок; сумісність з бажаними розмірами та формами текстур; висока точність та добра повторюваність; не пошкоджувати матеріал підкладки; мати задовільний рівень виробництва та, щонайменше, прийнятні витрати.

Економічні аспекти технологій текстурування пов'язані головним чином з попередньою обробкою, споживання енергії протягом періоду обробки та вартість обладнання. Більшість технологій, представлених у цьому огляді, доступні як для створення прототипів, так і для серійного виробництва текстурованих поверхонь. Однак економічний аспект кожного методу текстурування залежить від великої кількості параметрів: часу обробки, маскування, контролю, матеріалу підкладки та текстури, точності, розмірів текстури,

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розмірів та форми заготовки, вимог, пов'язаних з навколишнім середовищем тощо. Крім того, коливання технологічного розвитку, швидкий розвиток доступних технологій текстурування та відмінності, що виникають через географічні обставини, роблять оцінку точної вартості будь-якого з цих методів вичерпною та практично неможливою. Ще одним ключовим питанням щодо текстурованих поверхонь є необхідність попередньо визначеної процедури функціональної характеристики, яка може полегшити вибір геометричних параметрів текстури для трибологічних застосувань. Цю тему нещодавно розглядали Бруццоне та Коста,<sup>172</sup> яким вдалося запропонувати нові функціональні параметри для текстурованих підкладок, що дозволяють кореляцію між геометричними характеристиками та бажаною функціональністю текстури. Наприклад, у випадку систем ущільнення, текстура повинна дозволяти контролювати динаміку потоку для запобігання витоку, окрім своєї початкової функції мікрогідродинамічної опори, тобто зменшення тертя. Отже, в цьому випадку форма та орієнтація мікроелементів відносно основного напрямку потоку, тобто напрямку ковзання, заданого рухомим компонентом, є критичними параметрами.<sup>20,93,94,126</sup> Так само розмір мікроелементів, тобто співвідношення сторін текстури, слід контролювати, щоб запобігти всмоктуванню мастила з контакту або руйнуванню поверхні, що з'єднується, в змащеній системі.

Контроль гідродинаміки рідини, а також контроль властивостей змочуваності на межі розділу тверда/рідка речовина може бути ключем до покращення продуктивності, надійності та подовження терміну служби змащених механічних систем.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Список літератури

1. Цзян Дж. Х. та Вайтхаус Д. Дж. Технологічні зрушення в метрології поверхні. CIRP Ann Manuf Technol 2012; 61: 815–836.
2. Стаут К. Дж. та Блант Л. А. Внесок у дискусію щодо класифікацій поверхонь — випадкові, систематичні, неструктуровані, структуровані та інженерні. Int J Mach Tool Manuf 2001; 41: 2039–2044.
3. Стаут К.Дж., Салліван П.Дж., Донг В.П. та ін. Розробка методів характеристики шорсткості у 3 вимірах. 2-ге видання. Англія: Бірмінгемський університет, 1993.
4. Еванс К. Дж. та Браян Дж. Б. «Структуровані», «текстуровані» або «інженерно сконструйовані» поверхні. CIRP Ann Manuf Technol 1999; 48: 541–555.
5. Бек Г.К. Пристрій для хонінгування та протирання циліндрів. Патент US2166281 А, США, 1939.
6. Клайн JEG. Верстат хонінгувальний. Патент US2171799 А, США, 1939.
7. Шнайдер Ю.Г. Формування поверхонь з рівномірними мікрорізунками на деталях прецизійних машин та інструментів. Precis Eng 1984; 6: 219–225.
8. Сака Н., Ліо М.Дж. та Сух Н.П. Роль трибології в явищах електричного контакту. Wear 1984; 100: 77–105.
9. Етсіон І., Халперін Г. та Грінберг Ю. Збільшення терміну служби механічного ущільнення за допомогою лазерно-текстурованих поверхонь ущільнення. У: Матеріали 15-ї міжнародної конференції з герметизації рідинами, Маастрихт, Нідерланди, 16–18 вересня 1997 р., с. 3–11. Кренфілд, Велика Британія: BHR Group.
10. Етсіон І., Клігерман Ю. та Гальперін Г. Аналітичне та експериментальне дослідження лазерно-текстурованих поверхонь механічного ущільнення. Tribol Trans 1999; 42: 511–516.
11. Geiger M, Kleine M, Eckstein R та ін. Мікроформування.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

CIRP Ann Manuf Technol 2001; 50: 445–462.

12. Geiger M, Roth S та Becker W. Вплив мікроструктур, отриманих за допомогою лазера, на трибологічну поведінку кераміки. Surf Coat Tech 1998; 100–101: 17–22.
13. Geiger M, Popp U та Engel U. Мікротекстурування поверхні інструменту холодного кування ексимерним лазером — вплив на термін служби інструменту. CIRP Ann Manuf Technol 2002; 51: 231–234.
14. Chen LJ, Chen M, Zhou HD та ін. Підготовка супергідрофобної поверхні на нержавіючій сталі. Appl Surf Sci 2008; 255: 3459–3462.
15. Чо М. Х. та Парк С. Мікро-текстурування поверхні поліоксиметилену (POM) на верстатах з ЧПК та його трибологічні характеристики при змащеному ковзанні. Tribol Int 2011; 44: 859–867.
16. Паррейра Дж. Г., Галло К. А. та Коста Х. Л. Нові досягнення в безмасковому електрохімічному текстуруванні (МЕСТ) для трибологічних цілей. Surf Coat Technol 2012; 212: 1–13.
17. Петтерссон У. Поверхні, розроблені для високого та низького тертя. Докторська дисертація, Уппсальський університет, Швеція, 2005.
18. Сін Ю, Ден Дж, Ву З та ін. Вплив регулярних текстур поверхні, сформованих лазером, на трибологічну поведінку кераміки Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiC. Appl Surf Sci 2013; 265: 823–832.
19. Lejeune M, Chartier T, Dossou-Yovo C та ін. Струменевий друк керамічних мікростійкових масивів. J Eur Ceram Soc 2009; 29: 905–911.
20. Рупрехт Р., Бенцлер Т., Ханеманн Т. та ін. Різні методи реплікації для виготовлення тривимірних металевих мікроструктур. Microsyst Technol 1997; 4: 28–31.
21. Стівенс Л.С., Сіріпурам Р., Хайден М. та ін. Детерміновані мікронерівності на підшипниках та ущільненнях з використанням

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- модифікованого процесу LIGA. *J Eng Gas Turb Power* 2004; 126: 147–154.
22. Самаха М.А., Тафреші Х.В. та Гад-ель-Хак М. Супергідрофобні поверхні: від листка лотоса до підводного човна. *CR Mé'canique* 2012; 340: 18–34.
  23. Пуньо Н.М. На шляху до костюма Людини-павука: великі невидимі кабелі та самоочисні знімні суперадгезивні матеріали. *J Phys – Condens Mat* 2007; 19(395001): 17 с.
  24. Бруццоне ААГ, Коста Х.Л., Лонардо П.М. та ін. Досягнення в інженерії поверхонь для підвищення функціональності. *CIRP Ann Manuf Technol* 2008; 57: 750–769.
  25. Де Шиффр Л., Кунцманн Х., Пеггс Г.Н. та ін. Поверхні в точній техніці, мікроінженерії та нанотехнологіях. *CIRP Ann Manuf Technol* 2003; 52: 561–577.
  26. Дель Кампо А. та Арцт Е. Підходи до виготовлення складних мікро- та наноструктур на полімерних поверхнях. *Chem Rev* 2008; 108: 911–945.
  27. Фалконнет Д., Ксукс Г., Грандін Х.М. та ін. Підходи до поверхневої інженерії мікроструктурованих поверхонь для клітинних аналізів. *Біоматеріали* 2006; 27: 3044–3063.
  28. Сінгх Р.А. та Юн Е.С. Біоміметика в трибології – останні розробки. *JKPS* 2008; 52: 656–668.
  29. Гамільтон Д.Б., Валовіт Дж.А. та Аллен К.М.А. Теорія змащування мікронерівностями. *ASME J Basic Eng* 1966; 88: 177–185.
  30. Боргі А., Гуальтьєрі Е., Маркетто Д. та ін. Трибологічні ефекти текстурування поверхні азотованої сталі для високопродуктивних двигунів. *Wear* 2008; 265: 1046–1051.
  31. Валері С., Гуальтьєрі Е., Маркетто Д. та ін. Вплив структурування поверхні на трибологічні властивості нітридної сталі для

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автомобільної промисловості. У: АІТС-АІТ, міжнародна конференція з трибології, Парма, Італія, 20–22 вересня 2006 р., 7 с. Піза, Італія: АІТ (Італійська трибологічна асоціація).

32. Думітру Г., Романо В., Вебер Г.П. та ін. Лазерна обробка трибологічних DLC-плівок. *Diamond Relat Mater* 2003; 12: 1034–1040.
33. Павлус П., Галда Л., Дзерва А. та ін. Зносостійкість текстурованих сталевих кілець до абразивного зносу. *Wear* 2009; 267: 1873–1882.
34. Петтерссон У. та Якобсон С. Вплив текстури поверхні на гранично змащені ковзні контакти. *Tribol Int* 2003; 36: 857–864.
35. Вільєна Л.М., Седлачек М., Подгорнік Б. та ін. Текстуровання поверхні імпульсним Nd:YAG лазером. *Tribol Int* 2009; 42: 1496–1504.
36. Мошковіт А., Перфільєв В., Гіндін Д. та ін. Текстуровання поверхні за допомогою імпульсної повітряно-дугової обробки. *Wear* 2007; 263: 1467–1469.
37. Хадіната П.К. та Стівенс Л.С. М'який еластогідродинамічний аналіз радіальних манжетних ущільнень з детермінованими мікронерівностями на валу. *J Tribol* 2007; 129: 851–860.
38. Ковальченко А., Аджай О., Ердемір А. та ін. Вплив лазерного текстуровання сталевих поверхонь та параметрів швидкісно-навантажувального навантаження на перехід режиму змащування від граничного до гідродинамічного. *Trib Trans* 2004; 47: 299–307.
39. Рамеш А., Акрам В., Мішра С.П. та ін. Характеристики тертя мікротекстурованих поверхонь за змішаного та гідродинамічного змащування. *Trib Int* 2013; 57: 170–176.
40. Цю Ю. та Хонсарі М. М. Експериментальне дослідження трибологічних характеристик лазерно текстурованих кілець з нержавіючої сталі. *Trib Int* 2011; 44: 635–644.
41. Рук G, Kligerman Y та Etsion I. Експериментальне дослідження лазерного текстуровання поверхні для зворотно-поступальних

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автомобільних компонентів. Tribol Trans 2002; 45:

444–449.

42. Jeon NL, Nuzzo RG, Xia Y та ін. Візерунчасті самоорганізовані моношари, сформовані методом мікроконтактного друку з прямою селективною металізацією шляхом хімічного осадження з парової фази на планарних та непланарних підкладках. Langmuir 1995; 21: 3024–3026.
43. Vaeth KM, Jackman RJ, Black AJ та ін. Використання мікроконтактного друку для створення селективно вирощених плівок полі(п-феніленвінілену) та париленів, отриманих методом хімічного осадження з парової фази. Langmuir 2000; 16: 8495–8500.
44. Доулінг А. Дж. Нові стратегії мікрообробки поверхні тонких плівок TiN. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії, Технологічний університет Свінберна, Австралія, 2005.
45. Ву Б., Коен П.І., Фельдман Л.К. та ін. Контроль росту плівки за допомогою селективного збудження: ріст кремнію методом хімічного осадження з парової фази. Appl Phys Lett 2004; 84: 2175–2177.
46. Авігал Ю., Глозман О., Етсіон І. та ін. [100] – Текстуровані алмазні плівки для трибологічних застосувань. Diamond Relat Mater 1997; 6: 381–385.
47. Хабіг К.Х. Покриття, нанесені методом хімічного та фізичного осадження з парової фази: властивості, трибологічна поведінка та застосування. J Vac Sci Technol A 1986; 4: 2832–2843.
48. Маллік А.К., Шивашанкар С.А. та Бісвас С.К. Високовакуумна трибологія полікристалічних алмазних покриттів. Садхана 2009; 34: 811–821.
49. Сімоенс де Абреу К. Трибологічні властивості керамічних поверхонь, покритих алмазним осаджуванням методом осаджування. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії, Університет Мінью, Португалія, 2008.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

50. Бхачу Д.С., Во М.Р., Цейсслер К. та ін. Текстуровані плівки діоксиду олова, легованого фтором, сформовані методом хімічного осадження з парової фази. *Chem Eur J* 2011; 17: 11613–11621.
51. Хауден Р.М., Флорес Е.Дж., Булович В. та ін. Застосування PEDOT методом оксидативного хімічного осадження з парової фази (oCVD) до текстурованих та неплоских геометрій фотоелектричних пристроїв для покращеного захоплення світла. *Org Electron* 2013; 14: 2257–2268.
52. Hsu CH, Yeh MC, Lo KL та ін. Застосування мікроконтактного друку для безструмового покриття для створення мікромасштабних срібних візерунків на склі. *Langmuir* 2007; 23: 12111–12118.
53. Мондін Г., Шумм Б., Фріч Й. та ін. Виготовлення мікро- та субмікрометрових срібних структур методом мікроконтактного друку меркаптосиланів та прямої безструмової металізації. *Microelectr Eng* 2013; 104: 100–104.
54. Cao J, Wu Z, Yang J та ін. Селективне покриття міддю на поверхні полі(етилентерефталату), модифікованій самоорганізованим моношаром. *Colloids Surf A* 2012; 415: 374–379.
55. Кортікар С.Н. Створення та характеристика детермінованих мікронерівностей на опорних поверхнях. Магістерська дисертація, Університет Кентуккі, США, 2004.
56. Лі В. Експериментальний бенчмаркінг текстурованої поверхні губмоделі тюленів. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії, Університет Кентуккі, США, 2012.
57. Тянь Х., Сака Н. та Рабінович Е. Тертя та руйнування гальванізованих ковзних контактів. *Знос* 1991; 142: 57–85.
58. Венкатесан С. Текстури поверхні для покращеного змащування: методи виготовлення та характеристики. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії, Університет Кентуккі, США, 2005.
59. Парк Дж., Мун Дж., Шин Х. та ін. Виготовлення колоїдних фотоннокристалічних мікрочипів прямим записом за допомогою

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- струменевого друку. *J Colloid Interface Sci* 2006; 298: 713–719.
60. М'їнт МТЗ, Кїтсомбонло Р., Баруа С. та їн. Супергїдрофобнї поверхнї з використанням вибраних мїкрострижнїв оксиду цинку, отриманих за допомогою струменевого друку. *J Colloid Interface Sci* 2011; 354: 810–815.
61. Тей Н.Б., Мїнн М. та Сїнха С.К. Полїмерний струменевий друк мїкроточкових вїзерункїв SU-8 на поверхнї Si: оптимїзацїя трибологїчних властивостей. *Tribol Lett* 2011; 42: 215–222.
62. Тей Н.Б., Мїнн М. та Сїнха С.К. Трибологїчне дослідження мїкроточок SU-8, нанесених на поверхню Si, у випробуваннї на зворотно-поступальний ковзання «плоско по плоскому». *Tribol Lett* 2011; 44: 167–176.
63. Guan F, Chen M, Yang W та їн. Виготовлення вїзерунчастої мїкроструктури полїанїліну за допомогою мїкроконтактного друку та електрохїмїї. *Appl Surf Sci* 2004; 230: 131–137.
64. Лі Л., Чжун Й., Гун Дж. та їн. Виготовлення мїцних полїмерних плївок з мїкровїзерунками за допомогою статичного процесу дихальної фігури та вулканїзацїї. *J Colloid Interface Sci* 2011; 354: 758–764.
65. Zhang X, Wang X, Kong W та їн. Трибологїчна поведїнка поверхонь з мїкро/нано малюнком при контактї з колоїдним зондом АСМ. *Appl Surf Sci* 2011; 258: 113–119.
66. Снелл Д. та Кумбс А. Нова технологїя покриття для неорїєнтованих електротехнїчних сталей. *J Magn Magn Mater* 2000; 215–216: 133–135.
67. Тен Ельсхоф Дж. Е., Хан С. У. та Гобель О. Ф. Мїкрометричне та нанометрове паралельне формування структури з керамїчних та органїчно-неорганїчних гїбридних матерїалїв. *J Eur Ceram Soc* 2010; 30: 1555–1577.
68. Бевїлогуа К., Брауер Г., Дїтц А. та їн. Технологїя обробки поверхонь для

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- автомобілебудування. CIRP Ann Manuf Technol 2009; 58: 608–627.
69. Гангопадхай К., Віллермет П.А., Васселл В.К. та ін. Аморфні гідрогенізовані вуглецеві плівки для трибологічних застосувань. II. Плівки, нанесені на алюмінієві сплави та сталь. Tribol Int 1997; 30: 19–33.
  70. Хуа М., Там Х.Й., Ма Х.Й. та ін. Візерунчасті точкові покриття TiN, нанесені методом PVD на сталі M2: трибологічна поведінка за різних швидкостей ковзання. Wear 2006; 260: 1153–1165.
  71. Ниа М, Ма НУ, Ліб J та ін. Трибологічна поведінка візерунчастих точкових покриттів TiN, отриманих методом PVD, на сталі M2, покритих різними напругами зміщення. Surf Coat Technol 2006; 200: 3612–3625.
  72. Лінь Дж. Ф., Лю М. Х. та Ву Дж. Д. Аналіз механізму тертя та зношування конструкційних керамічних покриттів. Частина 2: вплив умов експлуатації та матеріалу підкладки. Wear 1996; 198: 7–14.
  73. Ердемір А. та Доннет К. Трибологія алмазоподібних вуглецевих плівок: останні досягнення та майбутні перспективи. J Phys D – Appl Phys 2006; 39: R311–R327.
  74. Dearnaley G та Arps GH. Біомедичне застосування покриттів з алмазоподібного вуглецю (DLC): огляд. Surf Coat Technol 2005; 200: 2518–2524.
  75. Хагедорн Д., Леффлер Ф. та Міс Р. Магнетронний розпилювальний процес для покриттів внутрішніх циліндрів. Surf Coat Technol 2008; 203: 632–637.
  76. Наноінженерні матеріали. Технологія CCVD та традиційні технології покриттів, <http://www.ngimat.com/technology/ccvd.html> (2008, доступ 1 квітня 2014).
  77. AJA International Inc. Системи напилення тонких плівок — системи розпилення, <http://www.ajaint.com/systems.htm> (2014, доступ 1 квітня 2014 р.).
  78. Guesmi I. De'po't de couches minces de cuivre sur substrats polyme're de formes

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

complexes par pulvérisation cathodique magnétron avec ionisation de la vapeur.  
Докторська дисертація, Université Paris Sud—XI, Франція, 2012.

79. Цзоу М., Кайб Л. та Ван Х. Дослідження адгезії та тертя нанотекстурованої поверхні, отриманої методом центрифугування колоїдного розчину наночастинок кремнезему. Tribol Lett 2006; 21: 25–30.
80. Осборн Л. Покращені трибологічні властивості поверхонь, нанесених мікроструктурами SU8/DLC. The Inquiry 2013; 15: 69–86.
81. Чанг С.М. та Дунг Р.А. Тонкі плівки ZrO<sub>2</sub> з контрольованою морфологією та товщиною, отримані методом золь-гель спінінгу. Тонкі тверді плівки 2005; 489: 17–22.
82. Добржанський Л.А. та Шіндлер М. Золь-гель TiO<sub>2</sub>-противідблискові покриття для кремнієвих сонячних елементів. JAMME 2012; 52: 7–14.
83. Мхайсагар Ю.С., Джоші Б.Н. та Махаджан А.М. Модифікація текстури поверхні тонких плівок ксерогелю SiO<sub>2</sub>, нанесених методом центрифугування, за допомогою силілювання TMCS. Bull Mater Sci 2012; 35: 151–155.
84. Ван дер Вал Б.П. Статичне та динамічне змочування пористих тефлонових поверхонь. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії, Гронінгенський університет, Нідерланди, 2006.
85. Гаррідо Х., Гонсалес Р., Каденас М. та ін. Трибологічна поведінка лазерно-текстурованих покриттів NiCrBSi. Wear 2011; 271: 925–933.
86. Лю Х., Ван Д. та Ху Д. Мікроструктура та зносостійкість композитного спеченого карбідного покриття на основі WC та TiC, отриманого лазерною текстурою та мікролегуванням. J Mater Process Technol 2009; 209: 805–810.
87. Ван Д.П., Чен Б.К., Шао Ю.М. та ін. Мікроструктура та механічні характеристики легуючих ямок, отриманих методом лазерного покриття та текстурування. Appl Surf Sci 2008; 255: 3251–3256.
88. Отеро Н., Ромеро П., Гонсалес А. та ін. Текстурування поверхні за

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- допомогою лазерного мікроплакування для покращення трибологічних властивостей. *J Laser Micro/Nanoeng* 2012; 7: 152–157.
89. Хуан С.В. Трибологічні характеристики та мікроструктура покриттів, отриманих методом фізичного осадження з парової фази, лазерно плакованих шарів WC/Ni та дуплексних покриттів. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії, Університет Воллонгонга, Австралія, 2000.
90. Секстон, К.Л. Наплавлення твердих матеріалів: традиційне проти лазерного. *Laser Age LTD*, <http://www.laserage.ie/> (2014, доступ 1 Квітень 2014 року).
91. Аманов А., Цубой Р., Ое Х. та ін. Вплив опуклостей, що утворюються внаслідок лазерного текстурування поверхні, на тертя ковзання та зношування. *Tribol Int* 2013; 60: 216–223.
92. Думітру Г., Романо В., Вебер Г.П. та ін. Лазерне мікроструктурування сталевих поверхонь для трибологічних застосувань. *Appl Phys A* 2000; 70: 485–487.
93. Jia X, Jung S, Haas W та ін. Чисельне моделювання та експериментальне дослідження перекачування вала лазерно структурованими валами з обертовими манжетними ущільненнями. *Tribol Int* 2011; 44: 651–659.
94. Jia X та Salant RF. Накачування вала лазерно структурованими валами з обертовими манжетними ущільненнями – теоретичні розрахунки та експерименти. У: 16-та Міжнародна конференція з ущільнень (ISC), 12–13 жовтня 2010 р., Штутгарт, с. 329–328. Кренфілд, Велика Британія: BHR Group.
95. Ямакірі Х., Сасакі С., Куріта Т. та ін. Вплив лазерного текстурування поверхні на тертя нітриду кремнію при змащуванні водою. *Tribol Int* 2011; 44: 579–584.
96. Vincent C, Monteil G, Barrie`re T та ін. Texturation de surface par laser sur un mate` riau he` te` roge` ne. У: 18e`me Congre`s Franc, ais de

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Me'canique Grenoble, 27–31 серпня 2007 р., документ №. 0346, 6 арк.

97. Аманов А., Чо І.С., Пьон Ю.С. та ін. Мікрзаглиблена поверхня, отримана за допомогою ультразвукової модифікації поверхні нанокристалів, та її трибологічні ефекти. *Wear* 2012; 286–287: 136–144.
98. Mourier L, Mazuyer D, Lubrecht AA та ін. Тимчасове збільшення товщини плівки в мікротекстурованих EHL-контактах. *Tribol Int* 2006; 39: 1745–1756.
99. Mourier L, Mazuyer D, Lubrecht AA та ін. Дія мікропорожнини, згенерованої фемтосекундним лазером, що проходить через круговий контакт EHL. *Wear* 2008; 264: 450–456.
100. Mourier L, Mazuyer D, Ninove FP та ін. Механізми змащування з лазерно-текстурованими поверхнями в еластогідродинамічному режимі. *Праці IMechE, частина J: J Engineering Tribology* 2010; 224: 697–711.
101. Prina-Mello A, Bari MA та Prendergast PJ. Порівняння ексимерного лазерного травлення та сухого травлення для виготовлення поверхні біоматеріалів. *J Mater Process Technol* 2002; 124: 284–292.
102. Климентов С.М., Гарнов С.В., Кононенко Т.В. та ін. Високошвидкісне глибоке абляційне формування каналів за допомогою комбінованих лазерних імпульсів пікосекундної дії та наносекундної дії. *Appl Phys A – Mater Sci Process* 1999; 69: 633–636.
103. Кононенко Т.В., Гарнов С.В., Піменов С.М. та ін. Лазерна абляція та мікроструктурування тонких покриттів TiN. *Appl Phys A – Mater Sci Process* 2000; 71: 627–631.
104. Кононенко Т.В., Кононенко В.В., Конов В.І. та ін. Формування антивідбивних поверхневих структур на алмазних плівках методом лазерного формування структури. *Appl Phys A – Mater Sci Process* 1999; 68: 99–102.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

105. Gao Y, Wu B, Zhou Y та ін. Двоетапний наносекундний лазерний процес текстурування поверхні з гладкою поверхнею. *Appl Surf Sci* 2011; 257: 9960–9967.
106. Сяо Н. та Хонсарі М.М. Теплові характеристики механічних ущільнень з текстурованою бічною стінкою. *Tribol Int* 2012; 45: 1–7.
107. Вінсент К., Гай Монтей Г., Бар'єр Т. та ін. Контроль якості лазерного текстурування поверхні. *Microsyst Technol* 2008; 14: 1553–1557.
108. Антошевський Б. Механічні ущільнення з текстурою ковзної поверхні — модель потоку рідини та деякі аспекти лазерного формування текстури. *Proc Eng* 2012; 39: 51–62.
109. Пейдж Дж. та Стівенс Л.С. Характеристика поверхні та експериментальна розробка для випробування радіального манжетного ущільнення. *Tribol Trans* 2004; 47: 341–355.
110. Nanbu T, Ren N, Yasuda Y та ін. Мікротекстури в концентрованому конформно-контактному змащенні: вплив форми dna текстури та відносного руху поверхні. *Tribol Lett* 2008; 29: 241–252.
111. Вакуда М., Ямаучі Ю., Канзакі С. та ін. Вплив текстурування поверхні на зменшення тертя між керамічними та сталевими матеріалами за умови змащеного ковзного контакту. *Wear* 2003; 254: 356–363.
112. Ван С., Ю Х. та Хуан В. Розробка візерунків з ямочками для різних обставин. *Lubr Sci* 2013; 25: 67–78.
113. Огнянович І. Експериментальний внесок у механіку канавчастих пневматичних підшипників типу «ялинка». Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії, Вища політехнічна школа Лозанни, Швейцарія, 2011.
114. Ван Х., Като К., Адачі К. та ін. Вплив лазерного текстурування поверхні SiC на критичне навантаження для переходу режиму водного змащування з гідродинамічного на змішаний. *Tribol Int* 2001; 34: 703–711.
115. Benayoun S, Bizi-bandoki P, Valette S та ін. Modification des proprie' te's

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

de mouillage d'alliages mé talliques au moyen de traitements de texturation laser femtoseconde. У: Atelier Thé matique du GDR MECANO «adhe sion-collage-mouillage», 6–7 жовтня 2011, Ліон, Франція, 2011.

116. Дескоєдр А. Характеристика плазми електроерозійної обробки. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії, Вища політехнічна школа Лозанни, Швейцарія, 2011.
117. Лауєрс Б., Крут Дж. П., Лю В. та ін. Дослідження механізмів видалення матеріалу при електроерозійній обробці композитних керамічних матеріалів. *J Mater Process Technol* 2004; 149: 347–352.
118. Тані Т., Фукудзава Ю., Морі Н. та ін. Явища механічної обробки в WEDM ізоляційної кераміки. *J Mater Process Technol* 2004; 149: 124–128.
119. Сімао Дж., Аспінволл Д.К., Вайз М.Л.Х. та ін. Текстурування прокатних валків за допомогою електродіодної термічної обробки. *J Mater Process Technol* 1994; 45: 207–214.
120. Кумар С., Сінгх Р., Сінгх Т.П. та ін. Модифікація поверхні за допомогою електроерозійної обробки: огляд. *J Mater Process Technol* 2009; 209: 3675–3687.
121. Ningsong Q, Xiaolei C, Hansong L та ін. Електрохімічна мікрообробка мікро-лункових масивів на циліндричних внутрішніх поверхнях з використанням сухого плівкового фоторезисту. *Chinese J Aeronaut* 2014; <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2014.03.012>.
122. Achtsnick M, Drabbe J, Hoogstrate AM та ін. Ерозійна поведінка та точність передачі малюнка захисних масок для мікроабразивного очищення. *J Mater Process Technol* 2004; 149: 43–49.
123. Адамс Д.П., Васіле М.Дж., Майєр Т.М. та ін. Методи сфокусованого іонного пучка для виготовлення геометрично складних компонентів та пристроїв. Звіт для Sandia. Звіт № SAND2004-0911, 2004.
124. Liu TC, Chen C, Chiu KJ та ін. Новий метод отримання EBSD для мікрровиступів Cu/Sn з використанням сфокусованого іонного пучка.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Mater Char 2012; 74: 42–48.
125. Сух М.С., Че Ю.Х., Кім С.С. та ін. Вплив геометричних параметрів на мікроканавчастий візерунок перехресного штрихування за умов тертя ковзання зі змащенням. Tribol Int 2010; 43: 1508–1517.
  126. Ся Ю. та Вайтсайдс Г. М. М'яка літографія. Annu Rev Mater Sci 1998; 28: 153–184.
  127. Ван Х., Като К., Адачі К. та ін. Карта несучої здатності для проектування текстури поверхні опорного підшипника з карбїду кремнію, що ковзає у воді. Tribol Int 2003; 36: 189–197.
  128. Коста Х.Л. та Хатчїнгс І.М. Зворотно-поступальні змащені ковзання по текстурованих сталевих поверхнях. Ciência e Tecnologia dos Materiais 2005; 17: 8.
  129. Zhao W, Wang L та Xue Q. Вплив мікро/нанотекстур та хїмічної модифїкації на нанотрибологічні властивості поверхні Au. Colloids Surf A 2010; 366: 191–196.
  130. Чо Ч.Х., Шїн Х.С. та Чу К.Н. Мікроструктурування цилїндричних поверхонь за допомогою електрохімічного травлення з використанням лазерного маскування. Appl Surf Sci 2014; 301: 442–450.
  131. Обїкава Т., Камїо А., Такаока Х. та ін. Мікротекстура на покритїй поверхні інструменту для високопродуктивного рїзання. Int J Mach Tools Manuf 2011; 51: 966–972.
  132. Лу Х. та Хонсарї М. М. Експериментальне дослідження впливу виїмки на криву Стрїбека підшипників ковзання. Tribol Lett 2007; 27: 169–176.
  133. Коста Х.Л. та Хатчїнгс І.М. Розробка методу електрохімічного текстурування без маски. J Mater Process Technol 2009; 209: 3869–3878.
  134. Брїнксмейер Е., Лукка Д.А. та Вальтер А. Хїмічні аспекти процесів обробки. CIRP Ann Manufact Technol 2004; 53: 685–699.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

135. Дорнфельд Д., Мін С. та Такеучі Й. Останні досягнення в механічній мікрообробці. CIRP Ann Manufact Technol 2006; 55: 745–768.
136. Чурі Н. Ротаційна ультразвукова обробка важкооброблюваних матеріалів. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії, Університет штату Канзас, Манхеттен, Канзас, 2010.
137. Греко А., Рафаяльсон С., Еманн К. та ін. Текстурування поверхні трибологічних інтерфейсів з використанням методу вібромеханічного текстурування. J Manufact Sci Eng 2009; 131: 8.
138. Греко А., Мартіні А., Лю Й. та ін. Показники контактної втоми кочення вібромеханічних текстурованих поверхонь. Tribol Trans 2010; 53: 610–620.
139. Седлачек М., Вільєна Л.М.С., Подгорнік Б. та ін. Моделювання топографії поверхні для зменшення тертя. Strojnis̃ki Vestnik – J Mech Eng 2011; 57: 674–680.
140. Shichao X, Minghe L, Caixia C та ін. Дослідження мікротекстури поверхні та трибологічних характеристик шліфованої поверхні в процесі точкового шліфування. Int J Surf Sci Eng 2014; 8: 225–238.
141. Коннор К.В. Метод хонінгування поршневих кілець. Патент US2318837 А, США, 1943.
142. Сліккервір П. Дж. та Інт Вельд Ф. Х. Модель візерунчастої ерозії. Wear 1999; 233–235: 377–386.
143. Де Мелло Дж. Д. Б., Гонсалвес Дж. Л. Молодший та Коста Х. Л. Вплив текстурування поверхні та твердого хромового покриття на знос сталей, що використовуються у валках холодної прокатки. Wear 2013; 302: 1295–1309.
144. Slikkerveer PJ, Bouten PCP і De Haas FCM. Високоякісне механічне витравлювання крихких матеріалів методом порошкової обробки. Sens Actuat A 2000; 85: 296–303.
145. Петтерссон У. та Якобсон С. Трибологічне текстурування сталевих

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- поверхонь за допомогою нової техніки алмазного тиснення. Tribol Int 2006; 39: 695–700.
146. Врбка М., Саманек О., Шперка П. та ін. Вплив текстурування поверхні на втому контакту кочення в межах неконформних контактів кочення/ковзання зі змішаним мастилом. Tribol Int 2010; 43: 1457–1465.
  147. Булатов В.П., Красний В.А. та Шнайдер Ю.Г. Основи методів обробки для отримання зносостійких та фреттінг-резистивних поверхонь з регулярними малюнками шорсткості. Wear 1997; 208: 132–137.
  148. Zhou R, Cao J, Ehmman K та ін. Дослідження текстурування поверхні на основі деформації. J Manuf Sci Eng 2011; 133(061017): 6.
  149. Кожела В., Дзерва А., Галда Л. та ін. Експериментальне дослідження впливу масляних кишень на стійкість до абразивного зносу. Tribol Int 2012; 46: 145–153.
  150. Галда Л., Кошела В. та Павлус П. Геометрія поверхні підшипників ковзання після ударного шліфування. Tribol Int 2007; 40: 1516–1525.
  151. Коржинський М. Виготовлення рельєфу на поверхні втулки підшипника методом ексцентрикового шліфування. J Mater Process Technol 2009; 209: 131–138.
  152. Шукла П.П. Ударне зміцнення інженерної кераміки за допомогою безконтактних енергетичних пучків, <http://www.shotpeener.com/library/pdf/2009023.pdf> (2009, доступ отримано 1 квітня 2014).
  153. Guo YB та Caslaru R. Виготовлення та характеристика мікробм'ятинових масивів, отриманих методом лазерного ударного зміцнення на поверхнях титану Ti–6Al–4V. J Mater Process Technol 2011; 211: 729–736.
  154. Лі К., Ху Й. та Яо З. Експериментальне дослідження виготовлення мікроямок на основі лазерної ударної обробки. Opt Laser Technol 2013; 48: 216–225.
  155. Ігуненк О. Кореляція параметрів дробоструминного зміцнення з характеристиками поверхні. У: Міжнародна конференція з

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- дробоструминного зміцнення – ICSP-9, Париж, Франція, 6–9 вересня 2005 р., доповідь № 2005046, с. 28–35. Нуазі-ле-Гран, Франція: ПТТ-International LLC.
156. Мітрович С., Адамович Д., Зівіч Ф. та ін. Тертя та зношування дробоструминно-зміцнених поверхонь легованих сталей 36CrNiMo4 та 36NiCrMo16 за умов сухого та змащеного контакту. *Appl Surf Sci* 2014; 290: 223–232.
157. Багеріфард С. та Гуальяно М. Втомна поведінка низьколегованої сталі з наноструктурованою поверхнею, отриманої методом інтенсивного дробоструминного зміцнення. *Eng Fract Mech* 2012; 81: 56–68.
158. Врбка М., Крюпка І., Свобода П. та ін. Вплив дробоструминної обробки на втому при коченні та мастильну плівку товщина в межах змішано змащених неконформних контактів кочення/ковзання. *Tribol Int* 2011; 44: 1726–1735.
159. Пьон Ю.С., Су К.М., Чо І.Х. та ін. Технологія ультразвукової модифікації поверхні нанокристаллами та її застосування для покращення втомної міцності, зносостійкості, терміну служби та енергоефективності підшипників. У: Міжнародна конференція з дробоструминного зміцнення, ICSP-10, Токіо, Японія, 2008, доповідь № 2008103, 6 стор. Індіана, США: Electronics Incorporated.
160. Аманов А., Чо І. Г., Кім Дж. Г. та ін. Застосування технології ультразвукової нанокристалічної модифікації поверхні (UNSM) для подовження терміну служби підшипника ковзання залізничної осі та зменшення тертя.втрата. У: Міжнародна конференція з дробоструминного зміцнення, ICSP-11, Саут-Бенд, США, 2011, доповідь № 2011066, с. 393–398. Індіана, США: Electronics Incorporated.
161. Фіоріні К., Прюдомм Н., Де Вейрак Г. та ін. Механізм молекулярної міграції для формування рельєфної решітки поверхні, індукованої лазером. *Synth Met* 2000; 115: 121–125.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

162. Леблон Х., Баріллль Р., Ахмаді-Канджані С. та ін. Спонтанне формування оптично індукованих рельєфних ґраток поверхні. *J Phys B At Mol Opt Phys* 2009; 42: 15.
163. Стаффорд К.М., Гаррісон К., Бірс К.Л. та ін. Метрологія на основі вимірювання згинання для вимірювання модулів пружності полімерних тонких плівок. *Nat Mater* 2004; 3: 545.
164. Швейкарт А. та Фері А. Контрольоване зморщування як новий метод виготовлення візерунчастих поверхонь. *Microchim Acta* 2009; 165: 249–263.
165. Флетчер Д.І., Капур А., Штайнхофф К. та ін. Зношування та еволюція форми поверхні нової поверхні, імплантованої карбідом титану, в умовах змащення. Праці IMechE, частина J: *J Engineering Tribology* 2000; 214: 597–610.
166. Gutierrez-Mora F, Erdemir A, Goretta KC та ін. Зношування ковзання в сухому та змащеному маслом волокнистих монолітів Si<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub> та Si<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub>/BN. *Tribol Lett* 2005; 18: 231–237.
167. Дуввур Р.С., Джексон Р.Л. та Хонг Дж.В. Самоадаптивні мікромасштабні поверхневі канавки для гідродинамічного змащування. *Tribol Trans* 2009; 52: 1–11.
168. Фесангарі М. та Хонсарі М. Про самоадаптивні поверхневі канавки. *Tribol Trans* 2010; 53: 871–880.
169. Шень К., Хуан В., Ма Г. та ін. Нова текстура поверхні для магнітного рідинного змащення. *Surf Coat Technol* 2009; 204: 433–439.
170. Григор'єв А., Токарев І., Корнєв К.Г. та ін. Суперомніфобні магнітні мікротекстури з дистанційним керуванням контроль змочування. *J Am Chem Soc* 2012; 134: 12916–12919.
171. Bruzzone AAG та Costa HL. Функціональна характеристика структурованих поверхонь для трибологічних застосувань. *Procedia CIRP* 2013; 12: 456–461.
172. Simms DL, Skurkiss PK та White CW. Візерунчастий хром-процес

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- створення плівки для матеПатент US4077851 А, США, 1978.
173. Скуркісс П.К. Процес хроматування металевих поверхонь. Патент US4082620 А, США, 1978.
  174. Gue' guen T. Фосфатація. Techniques de l'Inge' nieur, traite' Mate' riaux me' talliques. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/traitements-de-surface-des-metaux-en-milieu-aqueux-42359210> (2005, доступ отримано 1 листопада 2013).
  175. Бібуйк Г.А., Ларсен Н.Б., Деламарш Е. та ін. Літографія за межами світла: мікроконтактний друк з моношаровими резистами. IBM J Res Dev 1997; 41: 159–170.
  176. Денг Т., Ву Х., Бріттен С.Т. та ін. Прототипування масок, шаблонів та штампів/форм для м'якої літографії з використанням офісного принтера та фоторедукції. Anal Chem 2000; 72: 3176–3180.
  177. Калвала П.Р., Бісабатіна Д.П. та Відеманн К.Е. Процес формування зносостійкого покриття, яке мінімізує сміття, Патент США US5955145 А, США, 1994.
  178. Тянь Х., Сака Н. та Рабінович Е. Фретінгове руйнування гальванізованих золотих контактів. Wear 1991; 142: 265–289.
  179. Ірвін Г.К., Джаганнатан Р., Джаганнатан С. та ін. Апарат для отримання візерунчастого покриття шляхом осадження стисненого рідкого розчину в камері контрольованого осадження. Патент EP1426115 А1, США, 2004.
  180. Епп Г. Виробництво візерунчастої металеві фольги. Патент US 634523 А, США, 1899.
  181. Мотт М. та Еванс Дж. Р. Г. Цирконій: функціонально-градійований матеріал на основі оксиду алюмінію, виготовлений за допомогою керамічного струменевого друку. Mater Sci Eng A 1999; 271: 344–352.
  182. Гроувз Дж. Р., Хаммонд Р. Х., Матіас В. та ін. Розвиток двоосьової текстури при іонно-променевому осадженні оксиду магнію. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B 2012; 272: 28–32.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

183. Елліот А. Дж., Вальєхо Р. Н., Лу Т. та ін. Розробка текстурованих шаблонів оксиду магнію на поверхнях аморфних полімерів за допомогою іонно-променевого осадження. *Appl Phys* 2011; 4(065502): 8.
184. Андерссон Дж., Ерк Е.А. та Ердемір А. Тертя алмазоподібних вуглецевих плівок у різних атмосферах. *Wear* 2003; 254: 1070–1075.
185. Azzaroni O, Fonticelli MH, Benítez G та ін. Пряме наноструктурування металевих поверхонь з використанням самоорганізованих молекулярних плівок. *Adv Mater* 2004; 16: 405–409.
186. Аццароні О., Скідарді П.Л. та Сальварецца Р.К. Електроосадження металу на самоорганізовані моношари: універсальний інструмент для перенесення малюнка на тонкі металеві плівки. *Electrochim Acta* 2003; 48: 3107–3114.
187. Антошевський Б. Формування поверхні ковзання з текстурою за допомогою лазерної мікрообробки. *Przegląd Elektrotechniczny Electr Rev* 2011; 87: 6–8.
188. Етсіон І. Сучасний стан лазерного текстуровання поверхні. *Дж. Трайбол* 2005; 127: 248–253.
189. Етсіон І. та Шер Е. Підвищення паливної ефективності за допомогою поршневих кілець з лазерною текстурою поверхні. *Tribol Int* 2009; 42: 542–547.
190. Етсіон І. та Бурштейн Л. Модель механічних ущільнень з регулярною структурою мікроповерхні. *Tribol Trans* 1996; 39: 677–683.
191. Чой К.Х., Мейєр Дж., Масузав Т. та ін. Ексімерна лазерна мікрообробка для 3D-мікроструктури. *J Mater Process Technol* 2004; 149: 561–566.
192. Масузава Т., Олде-Беннекер Дж. та Ейндховен Дж. Дж. Дж. Дж. Новий метод тривимірної ексімерної лазерної мікрообробки, модуляція площі отворів (НАМ). *CIRP Ann Manufact Technol* 2000; 49: 139–142.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

193. Ціммер К., Браун А. та Бігл Ф. Комбінація різних методів обробки для виготовлення 3D полімерних структур за допомогою ексимерного лазера. *Appl Surf Sci* 2000; 154–155: 601–604.
194. Мейер Дж. Лазерна обробка (LBM), сучасний стан та нові можливості. *J Mater Process Technol* 2004; 149: 2–17.
195. Грьонендйк М.Н.В. та Мейер Й. Мікроструктури поверхні, отримані за допомогою фемтосекундних лазерних імпульсів. *CIRP Ann Manufact Technol* 2006; 55: 4.
196. Олівейра В., Оссет С. та Вілар Р. Мікро/наноstrukturування поверхні титану під дією стаціонарного та нестаціонарного фемтосекундного лазерного опромінення. *Appl Surf Sci* 2009; 255: 7556–7560.
197. Аллен Д.М., Шор П., Еванс Р.В. та ін. Іонний промінь, сфокусований іонний промінь та плазмовий розряд. *CIRP Ann Manufact Technol* 2009; 58: 647–662.
198. Махендран С., Девараджан Р., Нагараджан Т. та ін. Огляд мікро-ЕДМ. У: Матеріали міжвузівської конференції національна багатонаціональна конференція інженерів та комп'ютерних наук тiстi (IMECS) 2010, Гонконг, Китай, 17–19 березня 2010 р., 6 с. Гонконг, Китай: Newswood Limited.
199. Кавасегі Н., Сугіморі Х., Морімото Х. та ін. Розробка ріжучих інструментів з мікро- та нанорозмірними текстурами для покращення тертя. *Precis Eng* 2009; 33: 248–254.
200. Лей С., Девараджан С. та Чанг З. Дослідження ріжучого інструменту з мікрозмашенням у басейні для обробки маловуглецевої сталі. *J Mater Process Technol* 2009; 209: 1612–1620.
201. Петтерссон У. та Якобсон С. Текстуровані поверхні для покращеного змащування за високого тиску та низької швидкості ковзання ролика/поршня в гідравлічних двигунах. *Tribol Int* 2007; 40: 355–359.
202. Росоховська М., Ходнікевич К., Балендра Р. та ін. Гнучка інструментальна система для створення мікрогеометрій поверхонь. У:

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 4 М 2005 – Перша міжнародна конференція з багатоматеріального мікровиробництва, Карлсруе, Німеччина, 29 червня – 1 липня 2005 р., 4 стор.
203. Накано Х. Фотоіндуковане формування рельєфної решітки поверхні для монокристала 4-аміноазобензолу. *Int J Mol Sci* 2010; 11: 1311–1320.
204. Лучані А., Пламмер К.Дж.Г., Генслер Р. та ін. Формування поверхневого візерунка в покриттях, що тверднуть під дією ультрафіолету. *J Coat Technol* 2000; 72: 161–163.
205. Басу С.К., Скривен Л.Е., Френсіс Л.Ф. та ін. Механізм утворення зморшок у покриттях, що тверднуть. *Prog Org Coat* 2005; 53: 1–16.
206. Henry Y. Analyse experimentale de l'effet de la texturation des patins sur le comportement des bute'es hydrodynamiques a` geome'trie fixe. Докторська дисертація, Університет Пуатьє, Франція, 2013.
207. Чу Дж. В., Олвер А. В. та Спайкс Х. А. Вплив поперечної шорсткості в тонкоплівковому, змішаному еластогідродинамічному змащенні. *Tribol Int* 2007; 40: 220–232.
208. Скарді П., Леоні М. та Д'Інкау М. Рентгенівський аналіз текстурних доменів у неоднорідних тонких плівках, нанесених методом фізичного осадження з парової фази. *Тонкі тверді плівки* 2004; 467: 326–333.
209. Маріан В., Кіліан М. та Шольц В. Теоретичний та експериментальний аналіз частково текстурованого упорного підшипника з квадратними виїмками. *Праці IMechE, частина J: J Engineering Tribology* 2007; 221: 771–778.
210. Нгуєн Т.А. та Батлер Д.Л. Моделювання процесу прецизійного шліфування, частина 1: формування поверхні шліфувального круга. *Int J Mach Tools Manuf* 2005; 45: 1321–1328.
211. Свірад С. Аналіз текстури поверхні після ковзного полірування

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

циліндричними елементами. Wear 2011; 271: 576–581.

212. Юань С., Хуан В. та Ван Х. Вплив орієнтації мікротріщин на поверхні ковзання. Tribol Int 2011; 44: 1047–1054.

					КРММТВА 25.24326.000. ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		