

КУРГАНОВ РОМАН

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля

<https://orcid.org/0009-0006-9309-8191>e-mail: [rom7770@gmail.com](mailto:rom7770@gmail.com)

## КОНТАКТНО-АКТИВНІ ПОЛІМЕР-АБРАЗІВНІ КОМПОЗИТИ ДЛЯ ОБРОБКИ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

*В роботі наведено результати досліджень впливу модифікації поверхні наповнювача в полімерному інструментальному композиті на ефективність обробки титанових сплавів та хонінгування*

*Ключові слова: титанові сплави, хонінгування, обробка поверхні, наповнювач, абразивні композити.*

KURGANOV ROMAN

V. Bakul Institute for Superhard Materials

## CONTACT ZONE ACTIVE POLYMER ABRASIVE COMPOSITES FOR TITANIUM ALLOYS PROCESSING

*The article is devoted to the actual problem of complex processing of titanium alloys, from rough high-performance grinding to the finishing operation, namely fine honing. The results of the study were used in the technological process of manufacturing precision parts intended for operation in extreme conditions. The influence of modifying the filler surface on the structure and compositional features of the degradation products of the polymer bond of the abrasive composite in the zone of dynamic contact with the material processed was investigated. The possible mechanism of action of the active component of the degradation products on the surface layer of the metal during the grinding process was analyzed. They demonstrate the possibility of directed formation of adsorption-active centers on the surface of inorganic filler particles, namely pyrogenic silica obtained by the evaporation-condensation method, by choosing the optimal mode of powder heat treatment. It was found that the use of an excess of azoisobutyronitrile 5% by weight, as a hardener of a binder based on methyl methacrylate contributes to the formation of a substance with high surface activity in relation to titanium in the composite. The release of the above mentioned substance in the process of grinding titanium provides a significant reduction in the friction coefficient in the contact zone, which allows combining an increase in processing productivity with a simultaneous improvement in the quality indicators of the processed surfaces of parts. In particular, ( $\alpha+\beta$ ) - titanium alloy (BT22) were subjected to processing in the internal grinding mode. Finishing of tubular parts was carried out by honing. To improve the quality of honing and ease of processing, a corrosive active environment (CAE) was created in the cutting zone by filling the diamond antifriction polymer composite with chemically active components such as sodium fluoride, which promotes corrosion of the treated surface, thereby facilitating the removal of material layers and processing. A comparative series of active components was compiled in order of decreasing corrosive activity. The optimal time for heat treatment of silica particles depending on the heat treatment temperature was established, as well as the optimal concentration of the surfactant in the composite. Based on the data obtained, NaF was selected as a filler for finishing abrasive composites based on fluoroplastic.*

*Keywords: titanium alloys, honing, surface processing, filler, abrasive composites*

### Постановка проблеми

Титанові сплави широко застосовуються в машинобудуванні як конструкційні матеріали. Їх визнаними перевагами є механічна міцність, яка зберігається при довготривалій експлуатації в умовах високих температур, та велика втомна довговічність. Проте ці бажані для технологів якості таких сплавів мають свій зворотний бік, оскільки спричиняють значні проблеми, що виникають при механічній обробці виготовлених з них деталей, що відмічається в роботах [1,2]. Особливо суттєвим чином це проявляється в процесі шліфування виробів з титанових сплавів. Високі температури та сили різання, що супроводжують абразивну обробку цих матеріалів, призводять до утворення на оброблених поверхнях значної кількості дефектів. Це суттєво обмежує продуктивність виготовлення найбільш відповідальних виробів, призначених для роботи в екстремальних умовах експлуатації. Тому розробка нових підходів до полегшення умов у контактній зоні в процесі шліфування титану та його сплавів є актуальною задачею, шляхи вирішення якої показані в тому числі в роботах [3,4].

### Аналіз останніх джерел

Аналіз останніх опублікованих результатів досліджень в галузі процесів абразивної обробки титанових сплавів та створення відповідних інструментальних композитів свідчить про те, що основний масив проблем та обмежень, пов'язаних з цим колом задач, не зазнав якісних зрушень з початку широкого використання титанових матеріалів. Цей висновок рівною мірою стосується таких різних підходів до шліфування, як застосування одношарових інструментів, виготовлених за гальванічною технологією, інструментів з карбиду силіцію на керамічних зв'язках та інструментів з алмазу та кубічного нітриду бору на різних типах зв'язуючих, що показано в роботах [5,6]. Тому розвиток технологій абразивної обробки титанових сплавів та створення інструментальних композиційних матеріалів, які дозволяють підвищити ефективність такої обробки, викликають постійну зацікавленість у дослідників та виробників.

**Метою роботи є:** дослідження комплексного підходу, що поєднує внутрішнє шліфування, як попередню операцію, та чистове хонінгування з залученням факторів фізико-хімічної активації контактної взаємодії інструментальних композитів з матеріалом, що обробляється.

### Виклад основного матеріалу

Ми пропонуємо розвиток нового підходу до удосконалення робочої поведінки композитів з надтвердих матеріалів на полімерних зв'язках, призначених для шліфування та хонінгування виробів з титанових сплавів. Найважливіший принцип, що дозволяє ефективно керувати властивостями композитів, полягає у регулюванні надмолекулярної структури полімерної складової під впливом поверхні наповнювача. Як основний інструмент регулювання властивостей матеріалів ми застосували сорбційне закріплення сегментів полімерних молекул на активних центрах поверхні твердого тіла.

Об'ємна частка полімеру при цьому, як правило, невелика і становить 12 – 15%, причому полімер у таких системах фактично нанесений у вигляді тонкого шару на неорганічний субстрат. Такий неорганічний носій може бути представлений пористою матрицею з великою питомою поверхнею, або тонкодисперсним наповнювачем; при цьому по відношенню до зовнішніх навантажень, як механічних, так і теплових, він являє собою каркасний компонент системи, тоді як ролі керуючого компонента виступає поверхня пористої матриці або наповнювача з її активними центрами.

В якості неорганічного компонента композитів були використані порошки діоксиду кремнію, отримані методом випаровування-конденсації. Процес формування кремнеземних частинок конденсацією з парової фази призводить до накопичення великої кількості дефектів молекулярної структури матеріалу, що утворюється. Внаслідок деформації значної частини кремнекисневих тетраедрів іони силіцію, що входять до їх складу, переходять у координаційно ненасичений стан. Такі іони здатні до сильної сорбційної взаємодії з різними органічними молекулами, виступаючи в ролі точкових сорбційно-активних центрів. Сполуки, які утворюються, позначають у літературі як L-комплекси. Концентрація таких активних центрів на поверхні використаних наповнювачів може в широких межах та з достатньою відтворюваністю регулюватися шляхом термообробки, що показано на рис.1.

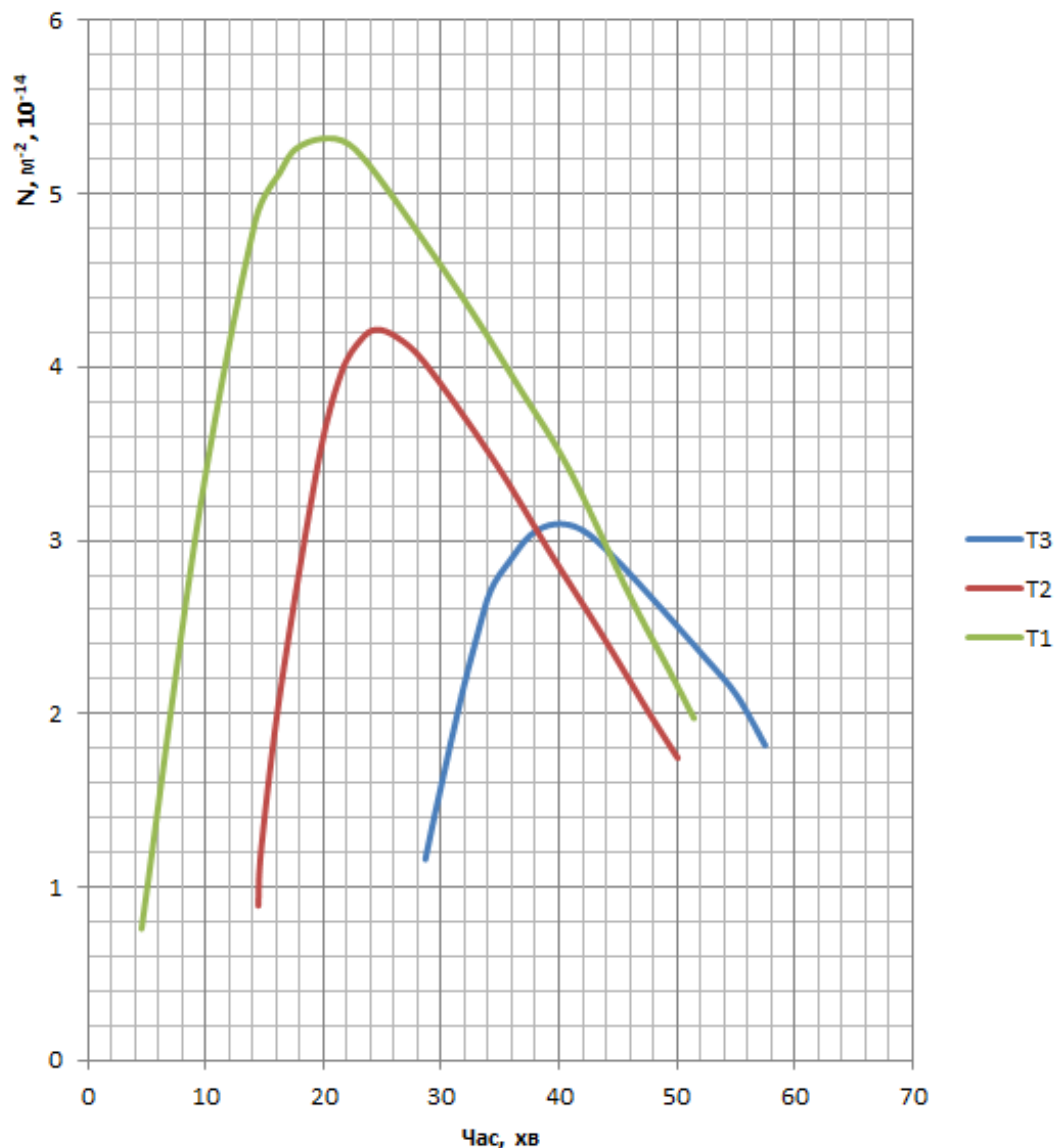


Рис.1. Залежність концентрації сорбційно-активних центрів на поверхні частинок кремнезему від тривалості термообробки ( $T_1=973$  K,  $T_2=1073$  K,  $T_3=873$  K)

Після того, як на поверхні наповнювача отримана задана концентрація сорбційно-активних центрів, останні можуть бути використані як інструмент для формування необхідної структури композиту, що синтезується. В даному випадку як вихідний мономер був використаний метилметакрилат, а як отверджувач - азоізобутиронітрил. Частина сорбційно-активних центрів поверхні наповнювача настільки міцно пов'язує молекули мономера (метилметакрилату), що виключає їх із процесу полімеризації. Такі сильно сорбовані молекули характеризуються значним зміщенням електронної щільності, що полегшує їхню взаємодію з фрагментами молекул отверджувача. Сполука, яка утворюється, має високу поверхневу активність по відношенню до різних металовмісних матеріалів. При цьому її молекула нестабільна і може тривало існувати тільки сорбованою на L- центр поверхні кремнезему. Ці поверхнево-активні молекули, десорбуючись з поверхні частинок наповнювача під дією тепла, що виділяється в контактній зоні, безперервно надходять малими, але достатніми порціями в проміжок між поверхнями, що контактують, сприяючи зниженню коефіцієнта тертя. Експерименти підтвердили наявність прямого взаємозв'язку між кількістю сорбційно-активних центрів на поверхні частинок наповнювача та вмістом поверхнево-активної речовини у складі газоподібних продуктів, що виділяються при терті. Це сприяє значному поліпшенню антифрикційних властивостей композиту (рис.2, 3). Наявність мінімуму на рис.3 обумовлено зміною характеру адсорбції поверхнево-активних молекул на металах зі зростанням їхньої концентрації в зоні динамічного контактування.

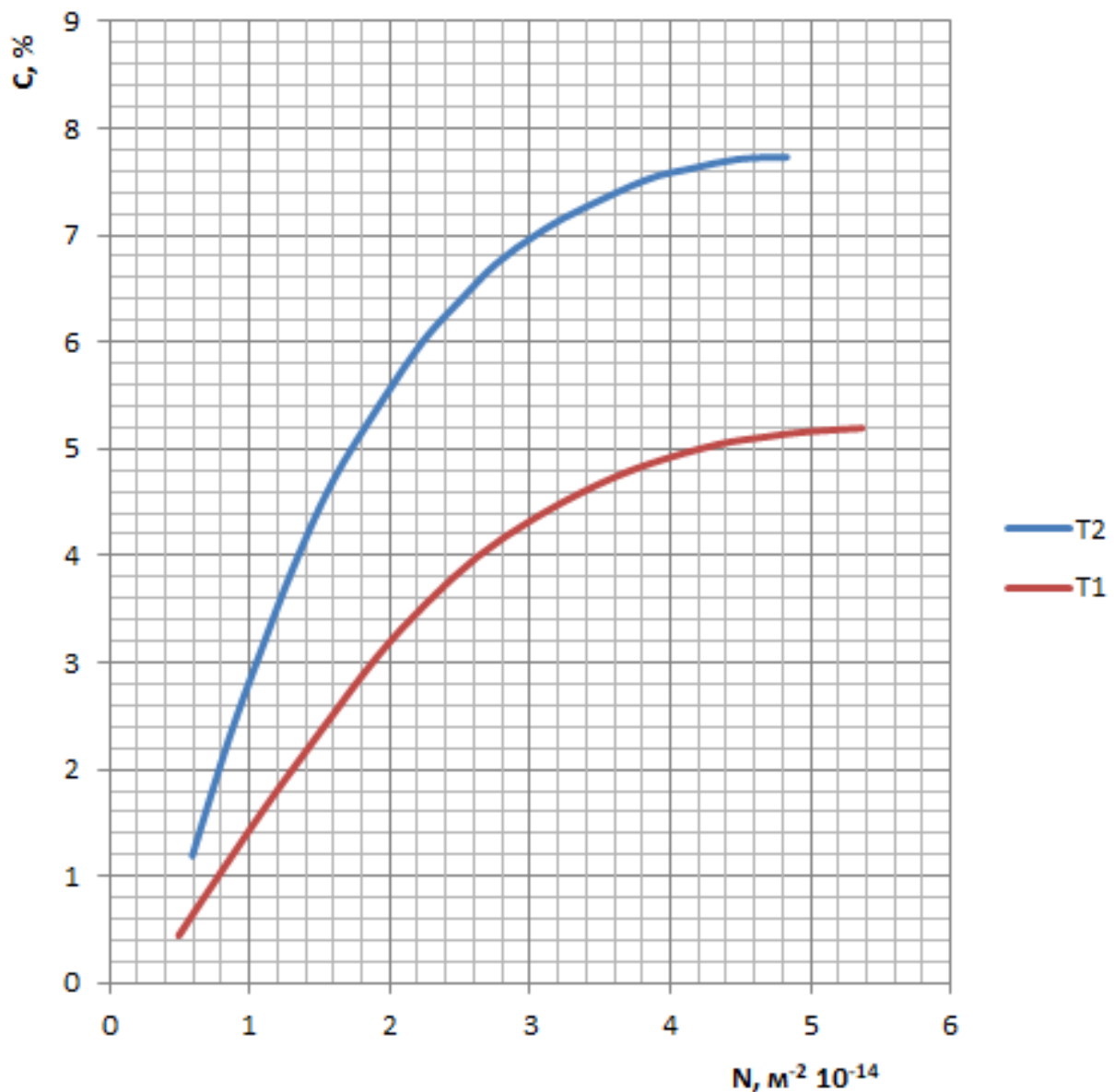


Рис.2. Залежність вмісту поверхнево-активної речовини у продуктах газовиділення ( $C$ ) від концентрації активних центрів ( $N$ ) ( $T_1=973 \text{ K}$ ,  $T_2=1073 \text{ K}$ )

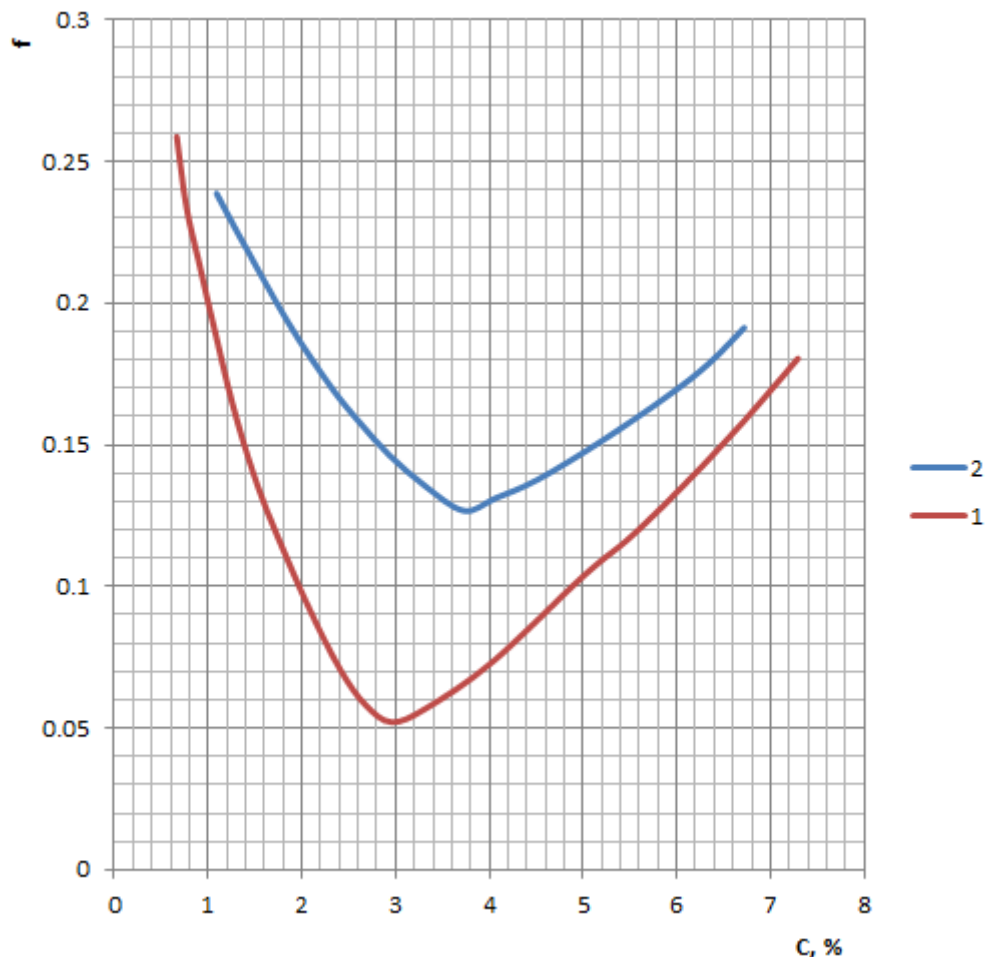


Рис.3. Залежність коефіцієнта тертя ( $f$ ) композиту по титановим сплавам (1 – BT9, 2 – BT22) від вмісту поверхнево-активного компоненту у продуктах газовиділення ( $C$ )

Найбільш вірогідна структура поверхнево-активної речовини за даними ЯМР та ІЧ спектроскопії показано на рис.4.

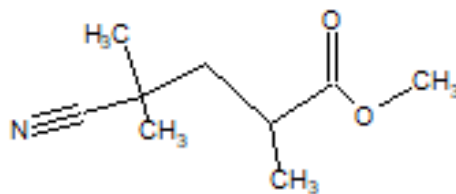


Рис.4. Вірогідна структура поверхнево-активної речовини

Зокрема, за даними УФ-спектроскопії, при збільшенні концентрації поверхнево-активних молекул на поверхні, замість того, щоб займати центри адсорбції "поодиночки", вони починають утворювати стійкі димери, що призводить до послаблення їх поверхневої активності. Отримані композити можуть бути ефективними антифрикційними матеріалами за рахунок активного впливу виділених ними газоподібних продуктів і спрямованої зміни умов тертя.

Необхідним етапом одержання прецезійних трубчастих виробів є фінішна операція хонінгування, яка забезпечує точність форми деталей та покращує структуру зформованого поверхневого шару. Складність фінішних процесів хонінгування полягає в протиріччі вимог до інструменту з інструментального антифрикційного полімерного композиту і поверхні, що оброблюється. Хонінгувальний інструмент повинен бути максимально зносостійким, оброблювані поверхні мають легко руйнуватися в процесі обробки, але набувати високої стійкості поза впливом використаного рідкого технологічного середовища.

У зв'язку з цим автором висунуто, обґрунтовано та експериментально підтверджено положення про доцільність використання вибіркової корозійної активності технологічного середовища для активації руйнування та зменшення енергії і роботи диспергування мікроповерхневого шару хонінгованих матеріалів і, отже, зниження механічних і термічних навантажень на інструментальний композит, що полегшує умови обробки та підвищує їх зносостійкість та ріжучу здатність. Технологічне корозійно-

активне середовище у зоні тертя-різання створюється шляхом наповнення композиції на основі фторопласту тонкодисперсними хімічно активними компонентами.

З урахуванням яскраво вираженої вибіркості дії корозійно-активного середовища, яка надає крихкості, і на підставі даних оцінки схильності до «корозії під напругою» високоміцних двофазних ( $\alpha+\beta$ ) -титанових сплавів вибраний ряд хімічно-активних компонентів, що відрізняються ступенем активності по відношенню до цих сплавів. Цей ряд за активністю будується в такій послідовності:  $\text{NaF} > \text{Na}_2[\text{SiF}_6] > \text{NaCl} > \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ . Ефективність впливу таких середовищ оцінювалася за їх здатністю до прискорення зйому сплавів:

$$I = \frac{V_k - V_b}{V_b}$$

Тут  $V_k$  та  $V_b$  – швидкість зйому сплавів алмазними суспензіями на основі хімічно-активних компонентів та дистильованої води відповідно.

Встановлені закономірності зміни продуктивності обробки титанових сплавів залежно від середовища та зовнішнього навантаження (рис.5) пов'язані з появою крихкості та посиленням дії механізму утворення мікротріщин руйнування поверхні сплавів за рахунок пружної енергії деформації в результаті прояву процесу корозії під напругою в зоні різання.

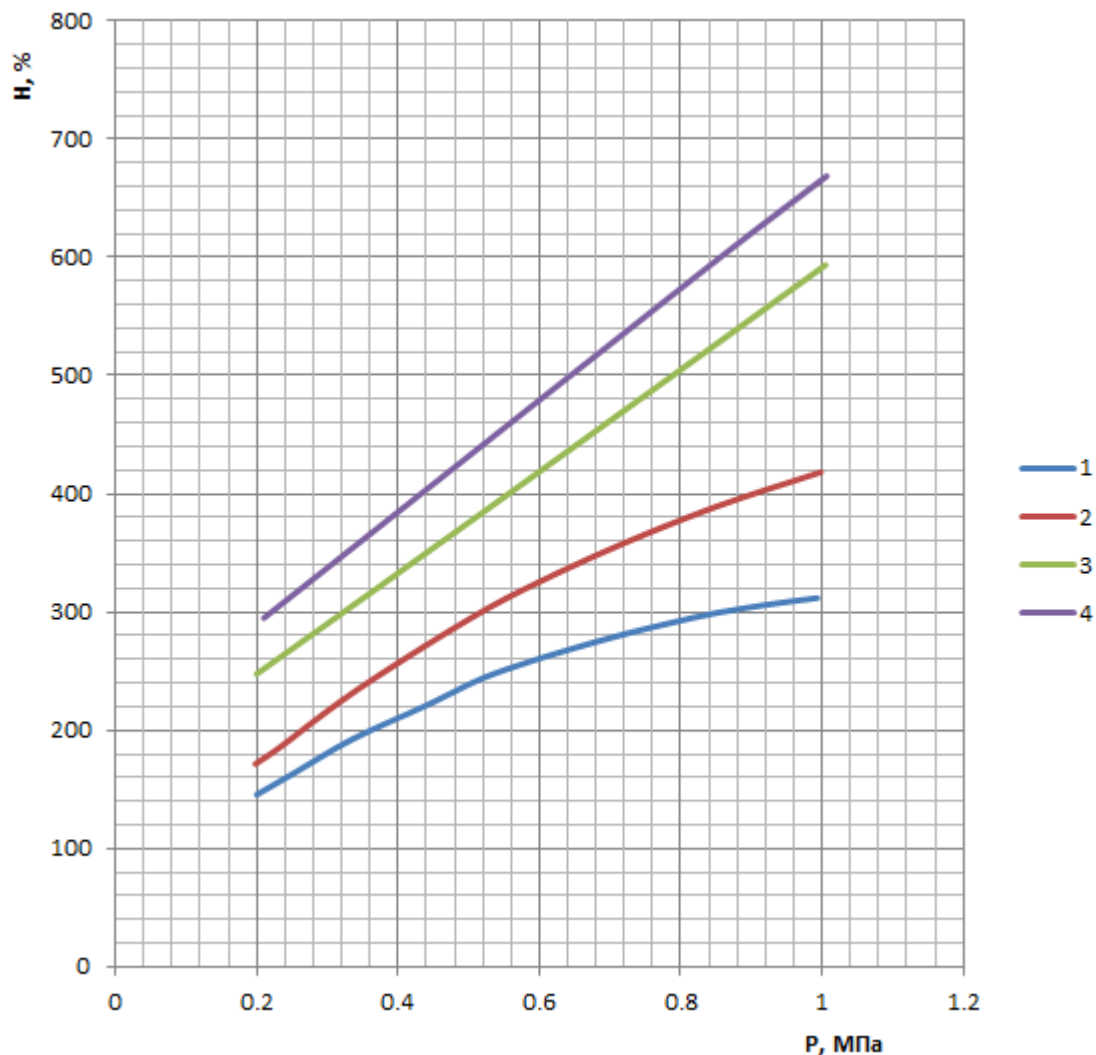


Рис.5. Залежність інтенсифікації зйому титанових сплавів VT16 (1), VT22 (2), VT14 (3), VT9 (4) алмазною суспензією на основі NaF від навантаження (P)

Збільшення диспергуючого впливу корозійних середовищ із підвищенням навантаження підтверджує таку інтерпретацію отриманих результатів. Відомо, що схильність сплавів титану до корозії під напруженням посилюється зі збільшенням вмісту в них алюмінію. Це, відображається і на оброблюваності ( $\alpha+\beta$ ) – сплавів з різним вмістом цього легуючого елемента. У середовищі NaF найбільш висока швидкість знімання характерна для титанових сплавів VT9 і VT14 з підвищеною концентрацією Al. Створення більш сприятливих умов для прояву корозійного руйнування і полегшення тертя-різання даних сплавів можна пояснити, виходячи зі внеску водневого розміщення в процес їх поверхневого диспергування.

Механохімічний характер корозії в середовищі NaF передбачає реакції за участю Ti і Al. Водень, що при цьому виділяється, адсорбується ювенільною поверхнею сплавів і викликає водневу крихкість. У ході цих реакцій більше водню виділяється при взаємодії середовища з Al, ніж з Ti. Тому сплави BT9 і BT14, що мають підвищений вміст Al, в умовах обробки виділяють більше водню, ніж сплави BT16 та BT22 з меншою концентрацією Al. Це, очевидно, визначає більш високу чутливість першої групи до корозії під напруженням та їх найкращу оброблюваність. При цьому ефект впливу корозійно-активного середовища на зйом металу в процесі обробки залежить не тільки від рівня його міцності, скільки від характеру легування.

На підставі даних досліджень NaF був обраний як наповнювач інструментальних композитів для хонінгувальних інструментів на основі фторопласту. Фторид натрію сприяє створенню в зоні контактування найбільш хімічно-активного технологічного середовища (водню) для полегшення умов тертя-різання і тим самим - підвищення ріжучої здатності та зносостійкості інструменту при хонінгуванні титанових сплавів (рис.6). У цьому випадку зростання зносостійкості інструменту пов'язане із суттєвим зменшенням роботи різання та механічних навантажень, що діють на алмазні зерна та композит загалом.

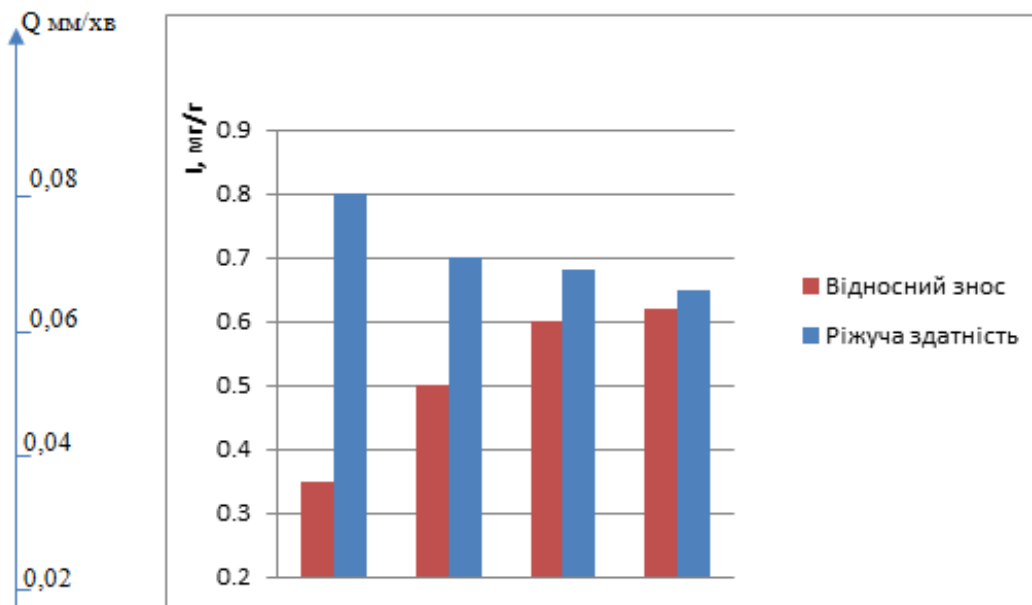


Рис.6. Відносний знос і ріжуча здатність брусків з фторопласту, наповнених різними хімічно-активними компонентами, при хонінгуванні сплаву BT9: 1 - NaF, 2 - Na<sub>2</sub>[SiF<sub>6</sub>], 3 - NaCl, 4 - H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

### Висновки

Розроблений комплексний підхід до абразивної обробки виробів з титанових сплавів. Підхід спрямований на удосконалення процесів формоутворення прецизійних деталей з отворами, та передбачає внутрішнє шліфування отвору інструментом з кубічного нітриду бору на композиційній полімерній зв'язці з подальшим фінішним хонінгуванням брусками з антифрикційної композиції, наповненої корозійно-активним компонентом (фторидом натрію). Визначені умови попередньої термообробки наповнювача абразивної композиції шліфувального інструменту, які забезпечують максимальну концентрацію адсорбційно-активних центрів на поверхні частинок. Показано, що за такої умови в процесі отвердження зв'язуючого, утворюється значна кількість поверхнево-активної речовини, здатної виділятися в зоні абразивного різання та суттєво покращувати умови тертя в динамічному контакті інструменту та матеріалу, що обробляється. Обґрунтований вибір найбільш дієвого корозійно-активного компоненту для інтенсифікації операції фінішного хонінгування отворів в деталях з титанових сплавів. Визначено, що найбільш ефективна активація процесу хонінгування досягається при обробці титанових сплавів з максимальним вмістом алюмінію (BT9, BT14).

### Література

1. Pramanic, A. (2014). Problems and solutions in machining of titanium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70, 919–928.
2. Xu, X., Yu, Y., & Huang, H. (2023). Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys. *Wear*, 255, 1421–1426.
3. Shi, Z., & Attia, H. (2021). High performance grinding of titanium alloys with electroplated diamond wheels. *Procedia CIRP*, X, 178–181. (Уточніть, будь ласка, номер тому — "X" поки вставлено як заглушка.)

4. Li, X., Chen, Z., & Chen, W. (2023). Suppression of surface burn in grinding of titanium alloy TC4 using a self-inhaling internal cooling wheel. *Chinese Journal of Aeronautics*, 24, 96–101.
5. Zhang, X., Liu, Z., Guo, G., An, Q., & Chen, M. (2023). Experimental research of grinding TC4 titanium alloy using green silicon carbide wheel. *Key Engineering Materials*, 487, 121–125.
6. Li, H., Tian, L., Fu, Y., & Liu, G. (2023). Experimental studies on forces and specific energy in high speed grinding of titanium alloy Ti6Al4V. *Advanced Materials Research*, 79, 112–117.

#### References

1. A.Pramanic Problems and solutions in machining of titanium alloys. The international journal of advanced manufacturing technology. – 2014.- Vol.70. – p. 919-928
2. Xu X., Yu Y., Huang H. Mechanisms of abrasive wear in the grinding of titanium (TC4) and nickel (K417) alloys // *Wear*. 2023. – Vol. 255 – p. 1421-1426.
3. Zhongde Shi, Helmi Attia High performance grinding of titanium alloys with electroplated diamond wheels// *Procedia CIRP*. – 2021. – p. 178-181
4. Li X, Chen Z, Chen W. Suppression of surface burn in grinding of titanium alloy TC4 using a self-inhaling internal cooling wheel // *Chinese Journal of Aeronautics*. - 2023. – Volume 24. – p. 96-101.
5. Zhang X, Liu Z, Guo G, An Q, Chen M. Experimental research of grinding TC4 titanium alloy using green silicon carbide wheel//*Key Engineering Materials* 2023. - № 487. – p. 121-125.
6. Li H, Tian L, Fu Y, Liu G. Experimental studies on forces and specific energy in high speed grinding of titanium alloy Ti6Al4V//*Advanced Materials Research*. – 2023. - № 79. - p.112-117.