

УДК 621.002.3:621.89

Гавриш А. П., д.т.н., професор; Роїк Т. А., д.т.н., професор;

Лотоцька О. І., к.т.н., доцент; Олійник В. Г., к.т.н., доцент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

### ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБОРУ АБРАЗИВНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ШЛІФУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ДЕТАЛЕЙ З ЛЕГОВАНИХ ТИТАНОВИХ КОМПЗИТІВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

*У статті наведені результати аналітико-експериментального дослідження по оптимізації вибору абразивних матеріалів для шліфування зносостійких деталей тертя технологічних комплексів, що виготовленні з нових типів композитних матеріалів 85Х6НФТ, 11Р3АМЗФ, 4ХМФТС та які синтезовані зі шламових відходів інструментальних сталей. Виявлено основні закономірності формування втомної міцності поверхневих шарів композитних деталей, які повинні бути шліфованими з метою забезпечення високих вимог експлуатаційних параметрів якості поверхонь тертя. Показано, що з точки зору забезпечення самих високих вимог якості поверхонь і, в першу чергу втомна міцність деталей, тонке шліфування необхідно виконувати кругами на основі природних і синтетичних алмазів. Розроблені технологічні рекомендації для промисловості з вибору шліфувальних інструментів.*

Тонке абразивне шліфування, композитні сплави леговані титаном, якість поверхонь, втомна міцність, тертя, технологічні комплекси.

**Постановка проблеми.** Однією з найголовніших проблем розвитку технологічних комплексів різних галузей народного господарства України є забезпечення високих показників їх надійності, довговічності, працеспроможності та ремонтоздатності.

З цієї точки зору доцільно звернути увагу на створення за останні роки зносостійких композиційних сплавів на основі інструментальних сталей легованих титаном [1–3].

Слід зазначити, що найбільш ефективно ці матеріали працюють при жорстких умовах експлуатації, коли температурне середовище забезпечує рівень нагрівання поверхонь деталей тертя у межах 750 – 800 °С і питомих тисках 5 – 8 МПа. Саме для забезпечення вимог зносостійкості були проведені широкопланові дослідницькі роботи по розробці технології синтезу заготовок деталей тертя технологічних комплексів зі шламових відходів високолегованих штампових і швидкорізальних інструментальних сталей, у складі яких присутні цінні легуючі елементи (титан, вольфрам, ванадій, ніобій тощо) і які є дешевою та вельми корисною вторинною сировиною для виготовлення конструкційних деталей [4–7]. При цьому легуючі елементи нових зносостійких сплавів утворюють в їх структурі чималу частку дрібнозернистих фаз – інтерметалідів. Усе це забезпечує отримання високих фізико-механічних та антифрикційних властивостей матеріалів (табл. 1).

Таблиця 1

Основні фізико-механічні та антифрикційні властивості титанових композиційних сплавів на основі високолегованих сталей

Матеріал	Межа міцності при згині, МПа	Твердість, НВ	Ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>	Коефіцієнт тертя	Інтенсивність зношування зразка, мкм/км	Інтенсивність зношування контртіла, мкм/км
Композит на основі інструментальної сталі 85Х6НФТ [1]	570 – 600	860 – 920	750 – 760	0,0055 – 0,0085	0,5 – 0,8	сліди
Композит на основі інструментальної сталі 11Р3АМЗФ [2]	590 – 620	850 – 910	770 – 790	0,0050 – 0,0080	0,45 – 0,70	сліди
Композит на основі інструментальної сталі 4ХМФТС [3]	600 – 630	855 – 915	780 – 790	0,0055 – 0,0082	0,45 – 0,75	сліди

Як відомо параметри зносостійкості деталей тертя у машинах і механізмах технологічних комплексів визначаються не тільки функціональними можливостями матеріалів, з яких ці деталі виготовлено, але і параметри якості їх поверхонь, що сформовані внаслідок механічного оброблення [4, 8–10].

З цієї точки зору деталі з композитів, що мають у своєму складі зазначені вище легуючі елементи (в першу чергу, титан і вольфрам) і належать до класу важкооброблюваних сплавів, вимагають особливого підходу до вибору типу абразивних інструментів, які мають бути застосовані для тонкої обробки робочих поверхонь тертя.

Сьогодні призначення того чи іншого абразивного інструменту (карбїду кремнію зеленого, електрокорунду білого, синтетичного алмазу, кубічного нітриду бора) здійснюється тільки з урахуванням умов формування найкращих параметрів якості поверхонь оброблення (шорсткість, глибина та ступінь наклепу, рівень залишкових напружень поверхневого шару) [4, 9].

На жаль, розгалужених досліджень технологічних процесів тонкого абразивного оброблення важкооброблюваних композитних сплавів, легованих титаном, вольфрамом, ванадієм та іншими дефіцитними для України елементами, що базуються на сучасних досягненнях у галузі побудови речовини та теорії контактування твердих тіл, на сьогодні не існує. Це створює умови для розробки і впровадження у виробництво при виготовленні технологічних комплексів різних по своєму технічному рівню (і далеко не завжди оптимальних) технологічних процесів, які, здебільше, базуються на досвіді технологів-практиків різних виробничих підприємств і які, найчастіше, створені для забезпечення конкретних потреб діючого виробництва без гарантій досягнення найкращих показників якості виготовлення деталей і відповідних умов їх надійності та зносостійкості.

Отже, дослідження по оптимізації вибору абразивних матеріалів для тонкого шліфування новітніх типів високозносостійких композиційних сплавів, легованих титаном, є важливою задачею, яка має незаперечне наукове і, що не менш важливо, практичне значення. Це ілюструє актуальність обробленої теми досліджень.

**Постановка задачі.** Метою даної роботи було дослідження впливу типу абразивного інструменту на один з найважливіших експлуатаційних параметрів роботи деталі у складі машино-технологічного комплексу – рівня витривалості при тонкому плоскому шліфуванні композитів, синтезованих на основі штампових та швидкорізальних інструменталей типу 85Х6НФТ, 11РЗАМЗФ, 4ХМФТС.

**Матеріали та результати досліджень.** Сплави, які мають у своєму складі титан і які набувають все більш широкого застосування у сучасних технологічних комплексах з метою забезпечення вимог працездатності, досить чутливі до умов механічного оброблення і, особливо, до умов шліфування. Вже при температурі 300 – 350 °С у цих сплавах відбуваються фазо-структурні перетворення, утворення нестабільних фаз, які по своїм фізико-механічним властивостям суттєво відрізняються від основного матеріалу. Ці перетворення обумовлюють появу зон концентрації напружень і, відповідно, ведуть до зменшення властивостей міцності деталей після їх шліфування [12–15].

Ряд досліджень, що виконані вітчизняними та зарубіжними авторами [9–16] показав, що шліфування металів повинно розглядатись як складний процес, у якому поряд з механічними контактними явищами відбувається хімічна і фізична взаємодія між матеріалом, що шліфується, та абразивним інструментом.

У ряді випадків, наприклад, при шліфуванні легованих титаном композитів 85Х6НФТ і 4ХМФТС, хімічні процеси, що відбуваються у зоні контакту абразиву з оброблюваним матеріалом, безпосередньо визначають особливості здійснення самого процесу шліфування.

Авторами статті виконана робота по пошуку таких абразивних матеріалів, які (з точки зору хімічної взаємодії) були б інертними по відношенню до оброблюваних деталей, не утворювали б хімічних зв'язків і цим сприяли б зниженню температури у зоні шліфування.

Отримані в останні роки досягнення у галузі побудови речовини дозволили встановити нові закономірності у галузі контактування твердих тіл. Відомо, що при утворенні кристалів з ізольованих атомів валентні електрони останніх поділяють на дві групи. Частина електронів локалізується у остовів атомів. Вони утворюють стабільні конфігурації, яким притаманні мінімуми вільної енергії. Інша ж частина електронів переходить у нелокалізований стан.

Теоретично та експериментально доведено, що здатність елемента до любого роду хімічного чи фізичного збудження суттєво знижується зі зростанням ваги стабільних конфігурацій і

відповідним зниженням долі нелокалізованих елементів, які мають здатність до найбільш легкого збудження. Ці базові положення були використані при виконанні досліджень по оптимізації вибору абразивних матеріалів для тонкого шліфування композитних сплавів, легованих титаном.

Розглядаючи процеси, що відбуваються при шліфуванні композитів, необхідно виходити з того, що взаємодія композиту з абразивним матеріалом шліфувального круга, що в його кристалах міститься відносно невисока статистична вага атомів зі стабільними конфігураціями ( $\approx 40\%$ ).

Відповідно доля нелокалізованих електронів складає до  $60\%$ . Це обумовлює підвищення інтенсивності хімічної взаємодії титану з абразивним матеріалом.

Ймовірність такої взаємодії підвищується, якщо атоми абразивних матеріалів мають таку електронну побудову, що вони здатні захопити нелокалізовані електрони від титану. При утворенні кристалів корунду  $Al_2O_3$  валентні електрони алюмінію переходять до атомів кисню і остови атомів алюмінію здатності прийняти нелокалізовані електрони від титану. В результаті течія електронів, що рухаються у одному певному напрямку, при обробці обумовлює схоплювання шарів абразиву і титану. Зовнішньо це має вигляд налипання часточок титану на зерна корунду (чи іншого абразивного матеріалу).

При контактуванні, наприклад, титанових композитів з частками карбіду цирконію (за рахунок потоку електронів, які мають мінусові заряди) відбувається відштовхування їх електронів.

Аналогічним чином можливо уявити собі і взаємодію титану у складі високотносостійкого композиту з такою тугоплавкою сполукою, як борид вольфраму, а також з алмазом синтетичним (АС) та кубічним нітридом бору (карбоніт КНБ, ельбор звичайної міцності ЛО, боразон ВО).

Таким чином, природа електронної побудови атомів абразивних матеріалів для шліфування легованих титаном композитних сплавів повинна бути такою, щоб виключалась чи зводилась би до мінімуму можливість захоплення атомами абразиву нелокалізованих електронів титану. Такими абразивними матеріалами, зокрема, можуть бути тверді тугоплавкі сполуки перехідних матеріалів з неметалами (карбіди, бориди та нітриди тугоплавких сполук).

Ступінь взаємодії титанових композитів 85Х6НФТ, 11РЗАМЗФ і 4ХМФТС з різними абразивними матеріалами досліджувались методом дифузійного відпалу.

Ці дослідження підтвердили коректність та вірність запропонованих теоретичних припущень. Так, якщо при використанні зерен електрокорунду білого (23А) дифузійний шар дорівнював  $400\text{ мкм}$ , зерен карбіду кремнію зеленого (63С) –  $50\text{ мкм}$ , то при використанні синтетичного алмазу (АС) він був у межах  $20 - 25\text{ мкм}$ , зерен карбіду цирконію –  $10 - 12\text{ мкм}$ . При використанні у якості абразиву бориду вольфраму дифузійного шару на межі контакту ріжучих зерен з поверхнею деталі з композитного сплаву взагалі не виявлено.

Проте ступінь хімічного подрібнення різних абразивних матеріалів з титановими композитами сама по собі ще не визначає придатності їх у якості матеріалу ріжучих зерен шліфувальних кругів. Необхідно надати цим матеріалам необхідну твердість.

Дослідження взаємодії вказаних абразивних матеріалів з титановими композитами здійснювалось методом тонкого плоского шліфування на прецизійному плоскошліфувальному верстаті FF-350 фірми «Abawerk» (ФРН) згідно методики, викладеній у роботах [4, 7, 11].

У процесі тонкого шліфування новітніх високотносостійких композитів силові фактори по своїм величинам – незначні. Тому всі зміни, що відбуваються у поверхневих шарах деталей оброблення є результатом впливу миттєвих контактних температур у зоні зрізання стружки [4, 11].

Дослідження зношування шліфувальних зерен з різних абразивних матеріалів було виконано за допомогою стереографіювання.

Цей метод широко застосовують при аерофотографуванні. При шліфуванні він дозволяє з великою точністю від слідкувати за процесом зношування окремого абразивного зерна у різні періоди шліфування. Також з його допомогою можливо від слідкувати за картиною налипання титану на ріжуче лезо абразивного зерна.

Дослідження показали, що налипання титану є причиною не тільки зниження ріжучих властивостей абразиву, а і причиною суттєвого погіршення якості поверхневого шару прошліфованих деталей [4, 11, 15]. Зерна карбіду кремнію зеленого (63С) вже після перших 2

хвилин роботи круга суттєво зношуються. Дещо вищою є стійкість карбіду кремнію чорного (53С).

При періоді роботи 35 хвилин зношування зерен бориду вольфраму та алмазу синтетичного (АС) практично відсутнє. При цьому відзначається значно менше налипання часточок титану, особливо у випадку шліфування алмазними зернами [17–21].

Оцінка характеру мікрорельєфу шліфованих поверхонь композитних деталей тертя технологічних комплексів здійснювалось методом розтягнутих профілограф з математичною обробкою результатів вимірювань.

Поверхня деталі з титанового композиту, що прошліфована алмазним інструментом, має на профілографі значно більш округлену форму дна западини, ніж поверхня, що отримана шліфуванням абразивними кругами (наприклад, карбіду кремнію зеленого). Ця різниця форми мікропрофілю, що утворені обробленням алмазними та абразивними кругами, може бути пояснена різною формою ріжучих зерен (радіус заокруглення, кут різання при вершині зерна) та різними коефіцієнтами тертя по металу [4, 11, 18, 19].

Якщо дряпання абразивним зерном утворює на поверхні обробки слід у вигляді канавки, що має нерівні рвані краї, то дряпання алмазним зерном дає зріз, який має чітку рівну поверхню.

Шліфування абразивними та алмазними зернами відбувається по-різному і, перш за все, це є наслідком того, що абразивні зерна мають коефіцієнт тертя по титановому композиту у 2,5 – 3 рази вищий, ніж у зерен з алмазів синтетичних та тугоплавких сполук.

Співставлення профілограф і кривих розподілу показує, що при ідентичних параметрах шорсткості поверхні, алмазне шліфування забезпечує отримання суттєво кращої рівномірності обробки, ніж при застосуванні абразивних шліфувальних кругів.

У якості основного критерію тих змін, які відбуваються у поверхневих шарах деталей з титанових композитів при шліфуванні абразивними інструментами з різних матеріалів (карбід кремнію зелений, електрокорунд білий, алмаз синтетичний, кубаніт тощо), було вибрано параметр втомної міцності. Велика серія дослідів і витривалість зразків, які були прошліфовані при різних умовах (рис. 1) показала, що найнижчий показник ліміту витривалості отримано при шліфуванні зразків шліфувальними кругами з електрокорунду білого (23А). Далі (за ступенем зростання ліміту витривалості) ідуть карбід кремнію зелений (63С), корунд зі змістом у його складі до 10 % оксиду хрому  $CrO_2$  (32А), карбід кремнію чорний (53А), карбід цирконію, борид вольфраму та синтетичний алмаз (АС).

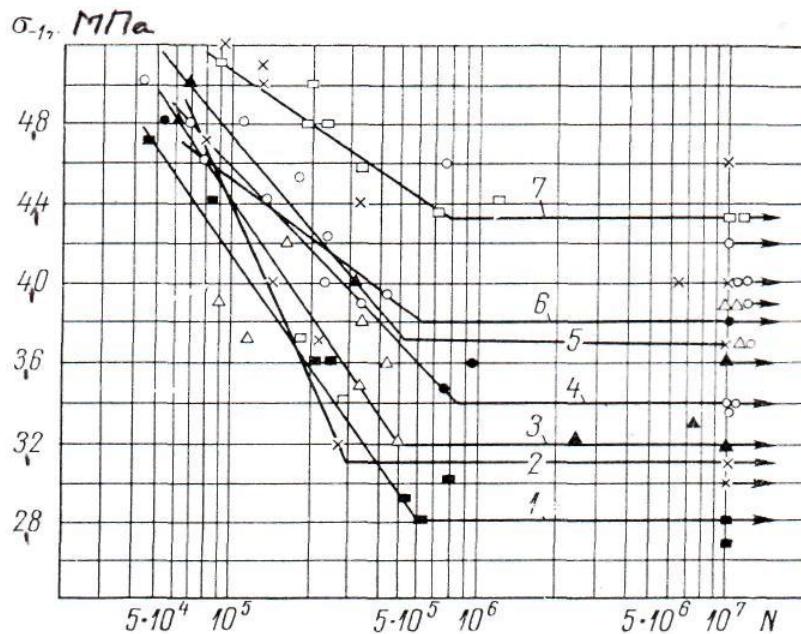


Рис. 1. Порівняльні криві витривалості зразків з титанового композиту 85Х6НФТ після шліфування кругами зернистістю 250 мкм з ріжучими зернами з різних абразивних матеріалів: 1 – електрокорунд білий (23А); 2 – карбід кремнію зелений (63С); 3 – корунд з 10 % оксиду хрому  $CrO_2$  (32А); 4 – карбід кремнію чорний (53А); 5 – карбід цирконію; 6 – борид вольфраму; 7 – синтетичний алмаз (АС)

Виконані дослідження дозволяють вважати про наступне:

1) абразивні матеріали, що застосовують сьогодні в технологічних процесах шліфуванням деталей тертя з композитних сплавів, які леговані титаном, не відповідають особливостям цих процесів надтонкого абразивного оброблення;

2) для суттєвого покращення умов формоутворення поверхневих шарів титанових композитів при їх шліфуванні і відповідного підвищення властивостей міцності деталей технологічних комплексів абразивні матеріали, що використовують для обробки, повинні бути у хімічному стані інертними по відношенню до композитних сплавів, з яких виготовлені зносостійкі деталі пар тертя машин і механізмів.

Цій умові повністю відповідають абразиви на основі тугоплавких сполук, синтетичних і природних алмазів.

**Висновки.** Узагальнюючи комплекс виконаних досліджень, необхідно зробити важливі як наукові так і практичні висновки.

1. Вперше досліджено технологічні процеси абразивного шліфування нових високозносостійких композиційних сплавів, що синтезовані зі шламових відходів штампових та інструментальних сталей 85Х6НФТ, 11РЗАМЗФ і 4ХМФТС і які містять у складі легуючих елементів титан, з урахуванням особливостей фізико-хімічної взаємодії матеріалу абразивного інструмента та високолегованих композитних деталей тертя для різних технологічних комплексів.

2. Показано, що параметри розмірної стійкості абразивних інструментів при шліфуванні важкооброблюваних титанових композитів суттєво залежать від структури побудови пари «абразив – матеріал обробки» та взаємодії електронів у контактній зоні зрізання стружки абразивним зерном з композитної поверхні деталі обробки.

3. Доведено, що параметри витривалості деталей з композитів, легованих титаном, та характеристики втоми поверхневих шарів деталей пар тертя з титанових композитних сплавів суттєво залежать від типу абразивного інструменту, який застосовується для технологічного процесу тонкого шліфування. Показано, що найкращі результати можуть бути отримані при використанні абразивів на основі тугоплавких сполук, синтетичних і природних алмазів.

4. Подальші дослідження будуть спрямовані на виконання експериментів і встановлення відповідних закономірностей при формуванні тонким шліфуванням параметрів якості поверхонь деталей тертя технологічних комплексів, які виготовлені з новітніх марок композитів на основі кольорових металів (мідь, нікель, алюміній).

1. Антифрикційний композиційний матеріал на основі сталі: пат. 60520 Україна: МПК С22С 33/02 / Роїк Т.А., Гавриш А.П., Киричок П.О., Гавриш О.А., Віщюк Ю.Ю., Мельник О.О.; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т України «Київський політехн. ін-т». – № U201013399; заявл. 10.11.2010 ; опублік. 25.06.2011, Бюл. № 12. – С. 3.

2. Антифрикційний композиційний матеріал на основі нікелю: пат. 31545 Україна: МПК С22С 19/03 / Роїк Т.А., Гавриш А.П., Гавриш О.А., Холявко В.В., Віщюк Ю.Ю.; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т України «Київський політехн. ін-т». – № U200714341 ; заявл. 19.12.2007 ; опублік. 10.04.2008, Бюл. № 7. – С. 3.

3. Порошковий підшипниковий матеріал на основі заліза для підвищених температур: пат. 32854 Україна: МПК С22С 33/02 / Роїк Т.А., Шевчук Ю. Ф.; опублік. 15.02.2001, Бюл. № 1. – С. 5.

4. Киричок П.О. Технологія поліграфічного машинобудування [Текст]: навч. посіб. / П.О. Киричок, Т.А. Роїк, А.В. Шевчук, А.П. Гавриш, О.І. Лотоцька. – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 508 с.

5. Роїк Т.А. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації : монографія / Т.А. Роїк, П.О. Киричок, А.П. Гавриш. – К. : НТУУ «КПІ». – К., 2007. – 404 с.

6. Роїк Т. А. Сучасні системи технологій заготівельного виробництва в машинобудуванні: монографія / Т.А. Роїк, А.П. Гавриш, О.А. Гавриш. – К. : ЕКМО, 2010. – 212 с.

7. Гавриш О.А. Новітні технології виробництва стандартизованих виробів : монографія / Т.А. Роїк, А.П. Гавриш, О.А. Гавриш. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 204 с.

8. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А.А. Маталин. – К. : Техника, 1971. – 144 с.

9. Маталин А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства машин / А.А. Маталин. – Л. : Машгиз, 1976. – 384 с.
10. Костецкий Б.И. Надежность и долговечность машин / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, Л.И. Бершадский, А.К. Караулов. – К. : Техніка, 1975. – 408 с.
11. Киричок П. О. Фінішне оброблення зносостійких деталей друкарських машин [Текст]: навч. посіб. / П.О. Киричок, Т.А. Роїк, А.П. Гавриш, А.В. Шевчук, Ю.Ю. Віцюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 514 с.
12. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. / Н.А. Кильчевский, А.О. Логинова. – К. Наукова думка, 1976. – 315 с.
13. Косторнов А. Г. Триботехническое материаловедение : монография / А.Г. Косторнов. – Луганск : изд. «Ноули», 2012. – 701 с.
14. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. / Э.В. Рыжов – М.: Машиностроение, 1966. – 194 с.
15. Рыжов Э.В. Технологические метод повышения износостойкости деталей машин. / Э.В. Рыжов. – К.: Наукова думка, 1984. – 340 с.
16. Динник А. Н. Избранные труды. Удар и сжатие упругих тел. / А.Н. Динник. – К. : изд. АН УССР, 1952. – 195 с.
17. Инструменты из сверхтвердых материалов (под. ред. акад. НАН Украины Н.В. Новикова, д-ра техн. наук С.А. Клименко. 2-е изд., перераб. и доп.). – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.
18. Сверхтвердые материалы. Получение и применение : монография в 6 т. / под. общ. ред. Н.В. Новикова. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2007. – Т. 6: Алмазно-абразивный инструмент в технологиях обработки / под. ред. А.А. Шепелева. – 340 с.
19. Лавриненко В.І. Надтверді абразивні матеріали в механообробні: Енциклопедичний довідник. / під заг. ред. акад. НАН України М.В. Новікова. – К.: вид-во ІНМ НАН України, 2013. – 456 с.
20. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів: підручник / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новоселов, Ф.Я. Якубов, під заг. ред. М.П. Мазура. – Львів: Новий світ, 2010. – 423 с.
21. Богуслаев В.О. Основи технології машинобудування: навч. посіб. / В.О. Богуслаев, В.І. Ципак, В.К. Яценко. – Запоріжжя: вид-во ВАТ «Мотор Січ», 2003. – 335 с.