



**КЛИМЕНКО**

**Сергій Анатолійович** — доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

## НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ПРОБЛЕМИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ІНСТРУМЕНТАМИ З НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

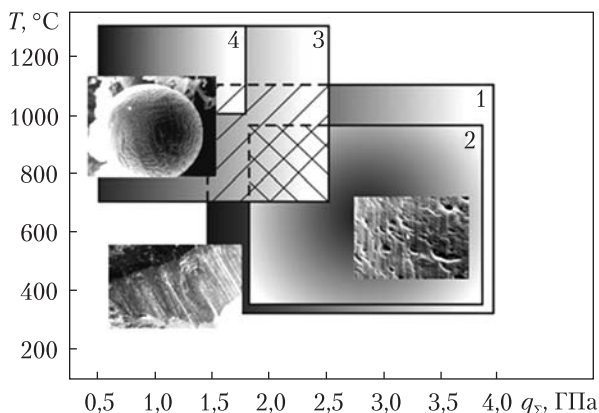
**За матеріалами наукової доповіді на засіданні  
Президії НАН України 11 липня 2018 року**

*У доповіді розглянуто розробки Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України в напрямі створення нових технологій високоефективної механічної обробки різальними та абразивними інструментами, оснащеними надтвердими матеріалами — алмазом і кубічним нітридом бору. Показано, що сучасні технології ґрунтуються на результатах досліджень закономірностей механіки, теплофізики, фізикохімії, кінетики, термодинаміки в зоні контактної взаємодії інструменту з оброблюваним виробом. Особливу увагу приділено питанням технологічного забезпечення стану поверхневого шару і управління експлуатаційними властивостями виробів. Наведено основні напрями перспективного розвитку процесів механічної обробки.*

**Ключові слова:** надтверді матеріали, різальний інструмент, полікристалічний кубічний нітрид бору.

Традиційно під механічною обробкою розуміють обробку виробів з різних матеріалів за допомогою механічного впливу з використанням різального інструменту. Механічну обробку здійснюють на металорізальних верстатах відповідно до встановленого технологічного процесу.

Сьогодні технічний прогрес у машинобудуванні великою мірою визначається вдосконаленням технологій виробництва машин. На виконання процесу формоутворення деталей припадає понад 40% загальної трудомісткості при виготовленні машин; механічної та фізико-технічної обробки зазнають 80% усіх вироблених деталей. За прогнозами експертів Міжнародної академії виробничої інженерії (CIRP), у майбутньому з удосконаленням машин обсяги механічної обробки деталей лише зростатимуть. При цьому основну увагу дедалі більше приділятимуть процесам фінішної механічної обробки, як заключної



**Рис. 1.** Карта механізмів зношування інструменту з ПКНБ: 1 – абразивне; 2 – адгезійне; 3, 4 – хімічне (3 – внаслідок контактно-реактивного плавлення продуктів взаємодії; 4 – внаслідок окиснення матеріалу інструменту). Інтенсивність забарвлення відповідає інтенсивності зношування інструменту

стадії виготовлення деталей машин, що забезпечує високу якість оброблених поверхонь.

Удосконалення процесів механічної обробки ґрунтується на результатах наукових досліджень і вивченні закономірностей перебігу механічних та фізико-хімічних явищ у зоні контактування інструменту з виробом з урахуванням дії середовища, що оточує зону обробки, а також механізмів зношування і руйнування інструментів, закономірностей формування поверхневого шару виробів у процесі обробки.

Ключову роль у процесах механічної обробки відіграють такі фактори, як інструмент, що використовується, матеріал його різальної частини, кінематика її руху і конструкція інструменту. Найчастіше фінішну обробку виробів із сучасних конструкційних матеріалів, що характеризуються високими механічними властивостями, проводять із застосуванням інструментів з надтвердих матеріалів – алмазу (СА) і кубічного нітриду бору (КНБ) [1, 2].

Провідною установою НАН України з вивчення фізико-механічних закономірностей механічної обробки, розроблення ефективних технологій та створення різального ін-

струменту є Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля. У цій галузі Інститут працює відповідно до наукового напрямку «Розвиток наукових основ створення нових високих технологій обробки металів і неметалів інструментом із надтвердих матеріалів, розробка методів і технологій застосування функціонально орієнтованих матеріалів у базових галузях промисловості», затвердженого постановою Президії НАН України від 12.02.2012 № 32.

Сучасні тенденції вдосконалення процесів механічної обробки полягають у намаганні досягти максимального результату за мінімальних витрат. У технологіях фінішної обробки деталей максимальний результат пов'язаний не лише з продуктивністю знімання матеріалу припуску, а й з необхідністю формування в поверхневих шарах виробу такого стану, який би якнайкраще відповідав вимогам експлуатації виробу.

Досягти максимального результату можна такими шляхами:

- збільшенням зони взаємодії інструменту з виробом;
- підвищенням інтенсивності взаємодії інструменту з виробом;
- забезпеченням узгодженості дії параметрів технологічної системи «верстат – деталь – інструмент»;
- максимальним використанням ресурсів системи.

Ці шляхи реалізуються в таких технологіях фінішної обробки:

- обробка з високою швидкістю різання, що сприяє мінімізації технологічної собівартості обробки та отриманню виробів високої якості;
- обробка без застосування МОТС, що знижує екологічне навантаження і зменшує витрати на виробництво;
- обробка в зміцненому стані – «тверде» точіння, під яким розуміють обробку інструментом з надтвердих композитних матеріалів твердістю понад 47 HRC із забезпеченням якості на рівні шліфування;
- застосування в різальних інструментах змінних різальних пластин і захисних покриттів.

Вихід з ладу різального інструменту зумовлений його зносом або руйнуванням. Може спостерігатися як крихке, так і пластичне руйнування інструменту. Інструментальний матеріал повинен мати достатній запас міцності і зносостійкості. Результати виконаних досліджень показали, що якість матеріалу різального інструменту визначається таким комплексом властивостей:

- об'ємні фізико-механічні властивості, що залежать від температури в зоні різання (твердість, міцність на вигин, в'язкість руйнування, теплопровідність та ін.);
- механічні характеристики поверхневого шару [3];
- хімічні властивості (жаростійкість, енергія Гіббса відносно елементів, що входять до складу оброблюваного матеріалу і навколишнього середовища, розчинність у залізі, нікелі, хромі; СВАСК).

Зношування інструменту визначається сукупністю механічної та хімічної взаємодії в контактних зонах.

Підходи до дослідження різальних інструментів проілюструємо на прикладі інструменту, оснащеного полікристалічними надтвердими матеріалами на основі кубічного нітриду бору (ПКНБ).

Комплекс досліджень процесу різання охоплює вивчення механіки, теплофізики, кінетики, фізикохімії, термодинаміки контактної взаємодії інструменту з оброблюваним виробом і елементами навколишнього середовища у зоні обробки. Кожна зі складових цього комплексу робить свій важливий внесок у розвиток уявлень про процеси, що відбуваються в зоні обробки. Наприклад, термодинамічний аналіз засвідчив високу ймовірність хімічної взаємодії інструментального і оброблюваного матеріалів у зоні різання з утворенням боридів заліза, нікелю, хрому та виділенням вільного азоту. Враховуючи це, теоретично встановлено й експериментально підтверджено специфічний вид зношування різального інструменту з ПКНБ — евтектичне зношування з утворенням і виносом з контактних ділянок інструменту продуктів взаємодії



**Рис. 2.** Зона обробки виробу із загартованої сталі ШХ15 (62–64 HRC) інструментом із ПКНБ-VL; швидкість різання — 270 м/хв

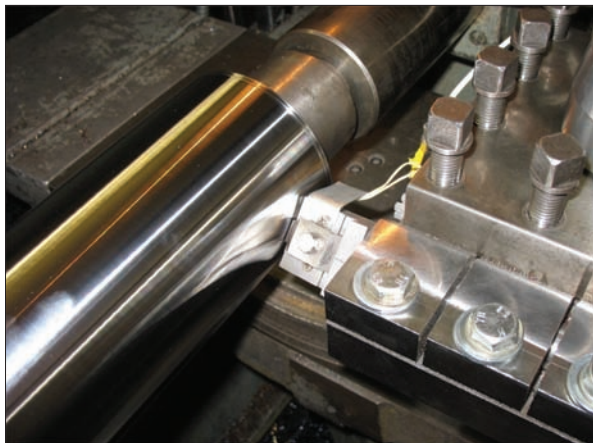
у вигляді рідкої фази. Температура різання, що відповідає цьому механізму зношування, є атрактором, який обмежує граничну швидкість різання таким інструментом.

Аналіз термобаричних умов у зоні обробки дав змогу розробити карту механізмів зношування інструменту з ПКНБ (рис. 1), за допомогою якої за температурою і тиском у зоні контакту інструменту з оброблюваним матеріалом встановлюють ймовірнісний механізм зношування різального інструменту і, відповідно, формулюють вимоги до матеріалу інструменту.

Відповідно до стандарту ISO 513-2014, полікристалічні надтверді матеріали на основі кубічного нітриду бору поділяють на три групи:

- 1) ВН — з концентрацією КНБ > 70 %;
- 2) VL — з концентрацією КНБ 45–65 %;
- 3) ВС — з покриттям.

Концентрація КНБ у різальному інструменті принципово визначає сфери його застосування. Перша група матеріалів призначена для обробки в умовах високих навантажень: великий перетин зрізу, динамічні навантаження. Друга група ефективна при остаточній без-



**Рис. 3.** Точіння деталі типу «вал» із загартованої сталі ШХ15 (62–64 HRC) інструментом, що працює за схемою «бриючого» різання

ударній обробці з високою швидкістю різання. Це пов'язано з тим, що композит з низьким вмістом КНБ характеризується теплопровідністю  $< 60$  Вт/мК і основна кількість тепла, що формується в зоні різання, відводиться зі стружкою. Швидкість різання інструментом з ПКНБ-VL під час точіння деталей із загартованих сталей досягає 5 м/с (рис. 2).

Дотичні напруження на контактних поверхнях інструменту, оснащеного такими ПКНБ, істотно знижуються, що зумовлює їх тривалу експлуатацію. Незважаючи на високу працездатність інструментів при обробці сучасних конструкційних матеріалів, підвищення їх довговічності залишається актуальним завданням. Одним з найперспективніших підходів є формування на робочих поверхнях інструменту захисних покриттів, які протидіють факторам, що негативно впливають на стійкість різальних інструментів.

Аналіз карти механізмів зношування різальних інструментів (рис. 1) дає можливість запропонувати варіанти захисних покриттів для різних умов обробки. Наприклад, для обробки, що супроводжується інтенсивною хімічною взаємодією, придатне покриття на основі NbN, яке ми назвали «активним». Воно дозволяє підвищити швидкість різання і стійкість інструменту, оскільки зсуває хімічну взаємодію

між КНБ і оброблюваним матеріалом у більш високотемпературну область.

Розроблено багат шарові (чергуються шари  $\text{Mo}_2\text{N}/\text{CrN}$ ) і багатокомпонентні ( $\text{TiAlSiYN}$ ) покриття для інструменту, який працює в області підвищених силових навантажень. Покриття мають високу твердість — 38 і 49,5 ГПа відповідно.

Перспективними є «самоадаптивні» покриття (наприклад,  $\text{AlN-Ti(Cr)-B}_2$ , твердість 22,2 ГПа), принцип роботи яких полягає в тому, що в результаті термобаричного впливу в зоні різання в тонкому поверхневому шарі покриття формується комплекс поліоксидних вторинних структур — трибоплівок, унаслідок чого знижується температура різання і підвищується стійкість інструменту.

Наявність захисного покриття на різальному інструменті впливає як на рівень температури на плямах спалаху на контактних поверхнях інструменту, так і на середню температуру різання, що мінімізує хімічну взаємодію в зоні обробки, підвищує стійкість інструментів, дає змогу збільшити продуктивність механічної обробки.

Найважливішим резервом підвищення продуктивності механічної обробки при забезпеченні необхідного стану поверхневого шару виробів є конструкція інструменту. Вона має враховувати особливості контактної взаємодії в зоні різання, мінімізуючи негативні явища. Наприклад, використання замість традиційного різця інструменту, що працює за схемою «бриючого» різання (рис. 3), завдяки зниженню ступеня пластичної деформації перед різальним інструментом при точінні великогабаритних прокатних валків із загартованих сталей дозволяє підвищити продуктивність обробки в 10 разів.

Технологічне управління якістю поверхні та експлуатаційними властивостями деталей машин — це науковий напрям технології машинобудування, пов'язаний з формуванням при механічній обробці такого стану в поверхневому шарі виробу, який потрібен у певних умовах експлуатації (стан визначається низкою показників: шорсткість поверхні, зміцнення поверх-



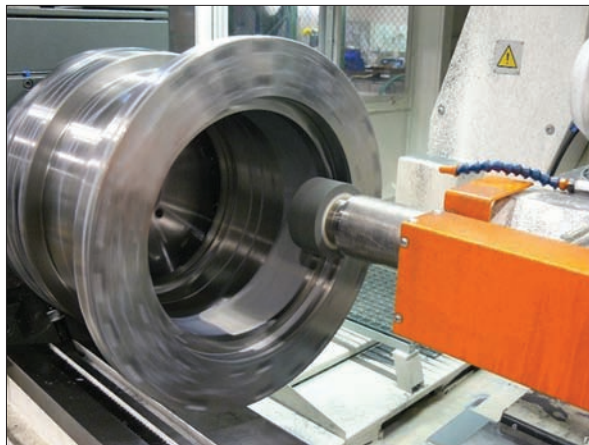
невого шару, залишкове напруження в ньому, структурний та енергетичний стан матеріалу тощо). Наприклад, спрямовано формуючи на поверхні виробу шорсткість, відповідну рівноважній шорсткості, яка утворюється на стадії приробки виробу, можна істотно скоротити час приробки, величину зносу на цій стадії, інтенсивність зношування на стадії сталої експлуатації. Це стосується й інших показників якості оброблених виробів.

За результатами проведеного комплексу досліджень процесів, що відбуваються в зоні різання, створено гаму ПКНБ на основі КНБ і СА, організовано виробництво інструментів на їх основі, розроблено технології високоефективної механічної обробки лезовими інструментами.

З огляду на сучасні підходи до створення різальних інструментів і відповідно до концепції «Індустрія-4.0», розпочато роботи зі створення SMART-інструменту, який здатен виконувати самодіагностику, аналізуючи за допомогою нейронних мереж інформацію, отриману, зокрема, від датчика акустичної емісії. Навчання нейронної мережі здійснювалося за такими параметрами, як стійкість інструменту та якості обробленої поверхні.

Подібний комплекс досліджень механіки, теплофізики, кінетики, термодинаміки контактної взаємодії було виконано і для алмазно-абразивного інструменту. Результатом робіт стало створення широкої гами алмазно-абразивних інструментів на металевій, органічній, гальванічній, керамічній, гібридно-полімерній зв'язках.

Варто також зупинитися на нещодавно створених інструментах зі зв'язками з вуглецевої кераміки з мультиграфеновою структурою. Низькотемпературна технологія виготовлення абразивних композитів, які мають динамічну поведінку, характерну для матеріалів на керамічних зв'язках, заснована на синтезі структур, що містять шари графену, зшиті ультрадисперсними частинками металів, оксидів та інших неорганічних сполук. На основі такої зв'язки розроблено шліфувальні круги для обробки виробів із жароміцних сплавів і започат-



**Рис. 4.** Шліфування отвору в деталі із жароміцного сплаву ЖС6К

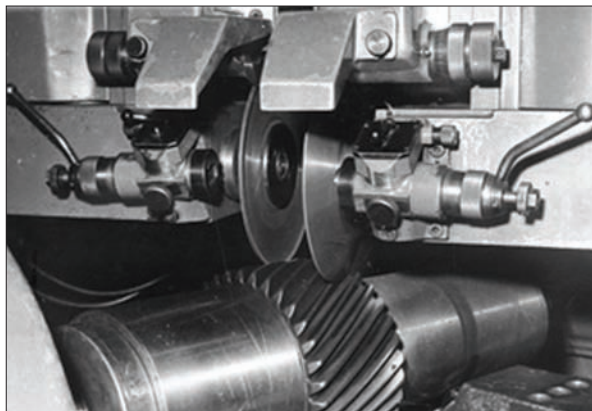
ковано їх виробництво (рис. 4). Ці інструменти дають можливість відмовитися від поставок керамічних кругів з Російської Федерації, яка на сьогодні є монополістом на українському ринку.

Запропоновано технології високопродуктивної фінішної обробки виробів з періодично повторюваним профілем, зокрема високоточних зубчастих коліс, у тому числі з титанових сплавів. На основі цієї технології розроблено і налагоджено випуск відповідних інструментів (рис. 5а).

Найбільш складними і точними абразивними інструментами, без яких не може обійтися виробництво авіаційних і газоперекачувальних турбін, компресорів, автомобілів, верстатів та інших складних машин, є правлячі роликки. Точність таких інструментів оцінюється у 2–3 мкм, а вартість може перевищувати кілька тисяч доларів за одиницю.

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України працює виробничадільниця з виготовлення таких інструментів (рис. 5б).

Розроблені нами технології, лезові і алмазно-абразивні інструменти широко застосовуються при виготовленні виробів із загартованих сталей, високомарганцевих сталей, твердих сплавів, чавунів, кольорових металів і сплавів, титанових сплавів, керамічних матеріалів, по-



а



б

**Рис. 5.** Шліфування високоточного зубчастого колеса інструментами з кубічного нітриду бору (а); алмазні правлячі ролики (б)

лімерних композиційних та деревостружкових композитів тощо.

Слід відзначити ефективність різальних інструментів з надтвердих матеріалів для ремонтного виробництва — обробки наплавлених і напилених покриттів при ремонті деталей автомобілів, сільгосптехніки, деталей металургійних машин (валків прокатних станів, роликів ролгангів та ін.).

Основними споживачами розроблених Інститутом технологій та інструментів є підприємства України — «Мотор Січ», «Івченко-Прогрес», «Зоря»–«Машпроект», «Зірка», «Азовмаш» та ін., провідні підприємства Бі-

лорусі (МАЗ, БелАЗ, Мінський тракторний завод, Мінський підшипниковий завод та ін.), Молдови (Рибницький металургійний завод), Казахстану («Арселор-Алмати»), заводи Балтії (Liepajas Metalurģis), Туреччини та інших країн.

Сучасний рівень технологій механічної обробки інструментами з надтвердих матеріалів, створених в Інституті, цілком відповідає сучасним світовим досягненням у цій галузі.

Перспективи розвитку технологій механічної обробки, на нашу думку, пов'язані насамперед з такими напрямками:

- вдосконалення теорії механічної обробки на основі уявлень про закономірності процесів у «цифровому» відображенні з використанням можливостей доповненої і віртуальної реальності;
- створення комп'ютеризованої системи вибору матеріалу інструменту для механічної обробки з урахуванням структурного стану матеріалу виробу;
- розширення гами композитів і покриттів для оснащення інструментів, які здатні адаптуватися до умов навантаження в зоні обробки і мають функціонально-орієнтовані властивості, що відповідають різному експлуатаційному навантаженню в інструменті;
- розроблення «інтелектуальних» інструментів, здатних до самодіагностики поточного стану з використанням предиктивної аналітики;
- розширення номенклатури виробництва інструментів з НТМ, у тому числі багатозонних з композитів ПКНБ-ВН, ПКНБ-ВЛ, ПКНБ-ВС, різців з великих монокристалів алмазу, правлячих інструментів з CVD-алмазами (алмази, отримані хімічним осадженням з парової фази);
- розроблення 3D-технологій формоутворення складнопрофільного інструменту з порошкових композиційних надтвердих матеріалів.

Слід зазначити, що вже створені і перспективні інструменти, призначені для механічної обробки деталей, стимулюють розвиток ключових галузей промисловості України. Вони відкривають можливості для використання

в машинах найсучасніших конструкційних матеріалів з поліпшеними механічними властивостями, потребують створення верстатів принципово нових конструкцій зі значно вищою продуктивністю і точністю.

Перспективна мета – відповідність створюваних технологій механічної обробки концепції «Індустрія-4.0».

Знання основних закономірностей процесів, що відбуваються в зоні обробки, з урахуванням принципів технологічного забезпечення якості і технологічної спадковості дозволяє розробляти високопродуктивні технології обробки виробів із сучасних конструкційних матеріалів, формувати в їх поверхневому шарі

стан, який забезпечував би необхідні експлуатаційні властивості. З огляду на це проблеми вдосконалення процесів механічної обробки і створення нових різальних інструментів слід розглядати насамперед як актуальне завдання сучасного матеріалознавства.

Результати досліджень і розробки Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, наявність вітчизняного виробництва інструментів з надтвердих матеріалів є основою для розвитку сучасних високопродуктивних технологічних процесів механічної обробки, перспективних для інноваційного розвитку базових галузей промисловості України.

## REFERENCES

### [СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Novikov N.V., Klimenko S.A. (Eds.). *Instrumenty iz sverkhтвердых materialov (Tools from superhard materials)*. (Moscow, 2014).  
[Інструменти із свертвердых материалов. Под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. М.: Машиностроение, 2014.]
2. Klimenko S.A., Kopeykina M.Yu., Mayboroda V.S. et al. *Finishnaya obrabotka poverkhnostey pri proizvodstve detaley (Finish processing of surfaces in details manufacturing)*. (Minsk, 2017).  
[Клименко С.А., Копейкина М.Ю., Майборода В.С. и др. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей. Под ред. С.А. Чижика, М.Л. Хейфеца. Минск: Беларуская навука, 2017.]
3. Klimenko S., Manokhin A., Belousova N., Kheifets M., Zakiev I., Kolmakov A., Nasakina E. Mechanical properties of surface layer of cutting elements from polycrystalline superhard composites based on cubic boron nitride. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. **79**(1): 108. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.99428>  
[Клименко С.А., Манохин А.С., Белоусова Н.Н. и др. Механические свойства поверхностного слоя режущих элементов из поликристаллических свертвердых композитов на основе кубического нитрида бора. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. Вып. 1. С. 108–114.]

S.A. Klymenko

Bakul Institute for Superhard Materials  
of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL PROBLEMS OF MECHANICAL MACHINING USING TOOLS FROM SUPERHARD MATERIALS: STATE AND PROSPECTS

According to the materials of scientific report at the meeting  
of the Presidium of NAS of Ukraine, July 11, 2018

Developments of the Bakul Institute for Superhard Materials of NAS of Ukraine in the direction of the mechanical machining using cutting and abrasive tools, equipped with superhard materials – diamond and cubic boron nitride – are considered. Modern tendencies of mechanical machining processes are shown and the approaches to their realization using the tools from superhard monocrystalline powders and polycrystalline composites are indicated. It is shown that modern technologies are based on the results of investigations of the laws of mechanics, thermophysics, physico-chemistry, kinetics, thermodynamics in the zone of contact interaction of the tool with the machined product. Examples are

given of developing a cutting tool that has the ability to self-diagnose on wear indicators and on the quality of the machined surface. Particular attention is paid to the issues of technological provision of the surface layer state and management of the operational properties of products. The main branches of application of the created tools and technologies of turning, grinding, dressing of abrasive circles both in the main production and in the processes of repair are covered. The directions of perspective development of mechanical machining processes in accordance with the concept "Industry-4.0" are presented. It is emphasized that the work carried out by the Institute on the domestic production of tools from superhard materials is the basis for the development of modern high-performance machining processes promising for the innovative development of the basic industries of Ukraine.

**Keywords:** superhard materials, cutting tools, polycrystalline cubic boron nitride.