УДК 621.9.02

ПІДВИЩЕННЯ РІЗАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ШЛЯХОМ ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ ІЗ ЗАДАНИМИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

О. Лисенко, канд. техн. наук, доцент
Центральноукраїнський національний технічний університет

У сучасному машинобудуванні високопродуктивна обробка матеріалів вимагає застосування інструментів, які здатні працювати у режимах надвисоких швидкостей різання [1], значних температурних навантажень [2] та динамічних коливань [3].

Стійкість ріжучого інструменту безпосередньо залежить від його фізико-механічних властивостей, що формуються мікроструктурою інструментального матеріалу. Сьогодні ключовим напрямом розвитку є створення інструментів з керованою внутрішньою будовою, що забезпечує оптимальний комплекс твердості, жаростійкості та в'язкості.

Широко відомі інструментальні матеріали, такі як швидкорізальні сталі, тверді сплави, металокераміка, значною мірою вичерпали свій потенціал щодо покращення властивостей традиційними шляхами: попередня обробка зрізуваного шару матеріалу деформуванням [4], розробка нових матеріалів з покращеними властивостями [5] нанесення на інструментальний матеріал спеціальних покрить [6].

Основні виклики пов'язані з нестабільністю структури при високих температурах, нерівномірним розподілом карбідних фаз, низькою ударною в'язкістю та схильністю до мікротріщиноутворення. Сучасні дослідження зосереджені на формуванні наноструктур, легуванні тугоплавкими елементами та створенні градієнтних композиційних матеріалів.

Застосування інструментів ШІ та механізмів 3D-друку, дозволило дослідникам провідних технологічних університетів США та Німеччини спроектувати склад та внутрішню будову матеріалу алюмінієвий сплав Al-0.4Er-1Zr-1.33Ni та забезпечити отримання його на практиці [7]. Отриманий матеріал, головним чином завдяки особливостям внутрішньої будови отримав міцність на 50 % більше ніж у найкращого за фізико-механічними властивостями авіаційного алюмінієвого сплаву Al 7075.

Команді китайських фізиків вдалося синтезувати лонсдейліт (відомий також як гексагональний алмаз) [8]. На відміну від класичного алмазу, в основі якого лежить кубічна структура кристалічної решітки з атомів вуглецю, основою лонсдейліту є шестикутники.

Дослідження отриманих зразків (розміром біля 0,06 дюйма (1,5 міліметра)), показало, що завдяки своїй структурі лонсдейліт більш жорсткий, до 60 % твердіший за свій кубічний аналог та суттєво стійкіший до окислення. Це означає, що лонсдейліт може витримувати екстремальні температури без втрати властивостей, що відкриває великі перспективи застосування його у якості інструментального матеріалу для промислового буріння, різання металів та полірування абразивних поверхонь.

Перспективним є визначення науково обґрунтованих підходів до формування внутрішньої будови інструментальних матеріалів з метою забезпечення підвищених різальних властивостей інструменту для високопродуктивної обробки на сучасних обробних центрах. Для досягнення поставленої необхідно проаналізувати структуру та фазовий склад типових інструментальних матеріалів, визначити ключові мікроструктурні параметри, що найбільше впливають на процес різання, зокрема розмір зерна, дисперсність карбідних включень і рівень залишкових напружень. Окрему увагу приділити обґрунтуванню методів керованого структурування матеріалу, серед яких наноперерозподіл фаз, легування, плазмово-іонні та дифузійні способи модифікації, а також дослідженню взаємозв'язку між мікроструктурою матеріалу та механізмами руйнування ріжучої кромки. На основі цього запропоновано

комплекс технологічних заходів, спрямованих на формування структури інструментального матеріалу з оптимальними фізико-механічними властивостями.

Проведений аналіз показав, що одним із найефективніших напрямів підвищення різальної здатності інструменту є наноструктурування та контроль зеренної будови матеріалу. Зменшення середнього розміру зерна твердих фаз, таких як WC, TiC та Al_2O_3, до рівня 50-200 нм забезпечує підвищення твердості на 15-25 %, покращення термостабільності та зменшення схильності до мікровідколів. Реалізація таких структурних змін можлива завдяки використанню плазмового легування, механохімічного подрібнення та гарячого ізостатичного пресування. Не менш важливим є кероване модифікування карбідної та нітридної фаз. Застосування багатокомпонентних зв'язок типу Co-Ni або Co-Fe-Ni, а також введення нанодисперсних нітридів TiN, AlN, Si_3N_4 сприяє зниженню пластичної деформації зв'язки в умовах високих теплових навантажень, забезпечує більш рівномірний розподіл напружень у структурі та підвищує ударну в'язкість інструментального матеріалу.

Важливу роль у підвищенні працездатності металорізального інструменту відіграє формування залишкових стискаючих напружень у поверхневих шарах. Це може бути досягнуто шляхом іонно-плазмового азотування, лазерної модифікації поверхні, а також нанесення комбінованих покриттів методами PVD і CVD. Сформовані в такий спосіб стискаючі напруження пригнічують зародження мікротріщин, підвищують зносостійкість у 1,5-2,2 рази та стабілізують ріжучу кромку за умов коливальних навантажень. Окремим чинником, що визначає ефективність інструмента в сучасних умовах високошвидкісної обробки, є теплостійкість інструментального матеріалу, тобто його здатність зберігати твердість за температур 600-900 °C для швидкорізальних сталей і твердих сплавів та до 1200 °C для кераміки і PCBN. Підвищення теплостійкості досягається за рахунок легування такими елементами, як W, Mo, V, Co, введення тугоплавких нанофаз і формування термостабільних інтерметалідних сполук, зокрема TiAlN і AlTiN.

Результати аналізу свідчать, що найвищими різальними властивостями характеризуються інструментальні матеріали з наноструктурованою твердою фазою, оптимальним співвідношенням карбідів різної дисперсності, градієнтною структурою зв'язки за схемою «жорстка поверхня – пластичне ядро», комбінованими зміцнювальними фазами нітридів та оксидів, а також попередньо сформованими стискаючими напруженнями у поверхневих шарах. Експериментальні дані, наведені у наукових джерелах, підтверджують, що використання гетерогенних наноструктур дозволяє збільшити стійкість фрез при обробці сталей на 40-70 %, підвищити ресурс твердосплавних пластин у важких режимах точіння до 2,5 рази та забезпечити стабільність процесу стружкоутворення в зоні високих температур, що перевищують 900 °C. Отже, формування внутрішньої будови інструментального матеріалу із заданими фізико-механічними властивостями є одним із ключових напрямів підвищення різальної здатності металорізального інструменту, особливо в умовах високошвидкісної та високопродуктивної обробки, характерної для сучасних п'ятиосьових обробних центрів.

Декілька десятків нанометрів внутрішньої будови сплаву правильно розставлених згідно дослідженого ШІ алгоритму дозволяють надавати суттєво нових фізико-механічних властивостей сплавам. Зміна будови кристалічної решітки алмазу з кубічної на гексагональну дозволяє збільшити міцність, жорсткість та температурну стійкість надтвердого матеріалу, що досі вважався найтвердішим матеріалом.

Формування внутрішньої будови інструментального матеріалу з використанням наноструктурування та диференційованих фазових композицій є ключовим чинником підвищення різальних властивостей інструменту. Керовані залишкові напруження та модифікація поверхневих шарів забезпечують довготривалу стабільність ріжучої кромки. Багатокомпонентне легування та комбінована термомеханічна обробка дозволяють створити матеріал із заданим комплексом твердості, теплостійкості та ударної в'язкості. Системний підхід до складу, мікроструктури та технології виготовлення забезпечує істотне зростання стійкості інструменту в умовах роботи на сучасних обробних центрах.

Список літератури

1. Пестунов, В. М. Нові технології та металообробний інструмент / В. М. Пестунов, О. В. Лисенко, В. М. Лисенко // Машинобудування та металообробка – 2003 : тези доповідей Першої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Кіровоград, 17-19 квіт. 2003 р. Кіровоград : КДТУ, 2003. - С. 177-179. – URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/16450

2. Ігнатьєв, Е. С. Основні тенденції розвитку сучасного ріжучого інструменту / Е. С. Ігнатьєв, О. В. Лисенко // Наукові записки : зб. наук. пр. - Кіровоград : КНТУ, 2011. - Вип. 11, ч. 1. - С. 221-225. - URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/4836

3. Підвищення стійкості різального клину розточувального інструменту при обробці переривчастих отворів / Є. Купчевич, О. Скібінський, А. Апаракін, О. Лисенко // Збірник праць молодих науковців ЦНТУ. - Кропивницький, 2024. - Вип. 14. Ч.1. - С. 44-49. - URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/17693

4. Підвищення ефективності обробки отворів корпусних деталей із чавуну деформуючим протягуванням / С. Заїка, А. Заїка, О. Лисенко, Я. Скібінський // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький: ХНУ, 2025. – № 5.1 (357). – С. 167-174. – DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-20

5. Лисенко, О. Забезпечення високих різальних властивостей інструментального оснащення високошвидкісних обробних центрів / О. Лисенко // Збірник тез доповідей викладачів, аспірантів та співробітників LVI науково-технічної конференції «Наука в ЦНТУ: основні досягнення та перспективи розвитку» за підсумками проведення «Дня науки – 2025» 24-25 квітня 2025 року. Кропивницький: ЦНТУ, 2025. - С. 75-76

6. Великий, Д. Покращення експлуатаційних властивостей твердосплавних різальних інструментів при обробці спеціальних конструкційних сталей / Д. Великий, О. Лисенко // «Наука - виробництву, 2021 = Наука в ЦНТУ: основні досягнення та перспективи розвитку»: зб. тез доп. здобув. вищ. освіти LV наук.-техн. конф. за підсумками проведення «Дня науки – 2021» (14 травн. 2021 р.). - Кропивницький: ЦНТУ, 2021. - С. 258-260. -URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12058

7. Taheri-Mousavi S. Mohadeseh, Xu M., Hengsbach F., Houser C., Ge Z., Glaser B., Wei S., Schaper M., LeBeau J. M., Olson G. B., Hart A. J. Additively manufacturable high-strength aluminum alloys with coarsening-resistant microstructures achieved via rapid solidification // Advanced Materials. - 2026. - Vol. 38, № 4. - Art. e09507. - DOI: https://doi.org/10.1002/adma.202509507

8. Lai S., Yang X., Shi J., Liu S., Guo Y., Yan L., Zang J., Zhang Z., Jia Q., Sun J., Cheng S., Shan C. Bulk hexagonal diamond // Nature. - 2026. - Vol. 651. - P. 621-625. - DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-026-10212-4