

СТРЕЛЬЧУК Р. М., РЯБЕНКОВ І. О.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ І ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТВЕРДОГО СПЛАВУ ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ

У роботі представлено результати комплексного дослідження впливу електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів на формування залишкових напружень у поверхневому шарі твердого сплаву ВК6 і його експлуатаційні характеристики. Методом рентгеноструктурного аналізу встановлено, що після електроерозійного шліфування рівень залишкових стискаючих напружень становить -3,8 ГПа, що істотно вище порівняно з алмазно-іскровим шліфуванням (-1,2 ГПа). Виявлено, що розміри областей когерентного розсіювання після електроерозійного шліфування становлять 200 Å, що свідчить про меншу теплонапруженість процесу порівняно з алмазно-іскровим шліфуванням (150 Å). Проведено стійкісні випробування ріжучих пластин під час точіння сірого чавуну СЧ20, оброблених різними методами шліфування. Встановлено кореляцію між величиною залишкових макронапружень стиснення та зносостійкістю інструмента. Експериментально доведено, що стійкість пластин після електроерозійного шліфування на 53% вища порівняно з алмазно-іскровим шліфуванням, що пояснюється більш сприятливим напруженим станом поверхневого шару і меншою шорсткістю обробленої поверхні.

Ключові слов: електроерозійне алмазне шліфування, залишкові напруження, твердий сплав, зносостійкість, рентгеноструктурний аналіз, макронапруження, полярність електродів, стійкість інструменту, поверхневий шар, деформація, фазовий склад.

STRELCHUK R., RIABENKOV I.

REGULATION OF THERMAL PROCESSES DURING ELECTROEROSIVE GRINDING WITH VARIABLE ELECTRODE POLARITY

The paper presents the results of a comprehensive study of the effect of diamond EDM grinding with alternating electrode polarity on the formation of residual stresses in the surface layer of VK6 hard alloy and its performance characteristics. X-ray diffraction analysis has shown that after EDM grinding, the level of residual compressive stresses is -3.8 GPa, which is significantly higher than after diamond spark grinding (-1.2 GPa). It was found that the size of the coherent scattering regions after EDM grinding is 200 Å, which indicates a lower thermal stress of the process compared to diamond spark grinding (150 Å). Stability tests of cutting inserts during turning of grey cast iron СЧ20, processed by different grinding methods, were carried out. A correlation between the value of residual macro compressive stresses and tool wear resistance was established. It has been experimentally proven that the durability of the plates after EDM grinding is 53% higher compared to diamond spark grinding, which is explained by a more favourable stress state of the surface layer and lower roughness of the machined surface.

Keywords: electrical discharge diamond grinding, residual stresses, hard alloy, wear resistance, X-ray diffraction analysis, macrostresses, electrode polarity, tool life, surface layer, deformation, phase composition.

Вступ. Якість поверхневого шару різального інструменту, що формується в процесі шліфування, істотно впливає на його експлуатаційні характеристики. Особливий інтерес становить вивчення залишкових напружень, що виникають у поверхневому шарі після різних методів шліфувальної обробки. У сучасному машинобудуванні широко застосовують твердосплавні інструменти, які потребують ефективних методів заточування і відновлення ріжучих властивостей. Електроерозійне алмазне шліфування зі змінною полярністю електродів є перспективним методом обробки твердосплавного інструменту, проте вплив цього методу на формування залишкових напружень і зносостійкість інструменту досліджено недостатньо.

Існуючі методи електроерозійного алмазного оброблення не завжди забезпечують необхідні якісні показники за одночасного зниження питомої витрати алмазного інструменту та енерговитрат. Особливо актуальною є проблема формування сприятливого напруженого стану поверхневого шару твердосплавного інструменту, оскільки саме він багато в чому визначає експлуатаційну стійкість ріжучих пластин. При цьому важливо враховувати вплив різних технологічних чинників – теплового, силового та фазового – на формування залишкових напружень у процесі шліфування.

Метою цього дослідження є встановлення закономірностей формування залишкових напружень у поверхневому шарі твердого сплаву ВК6 під час електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів і визначення їхнього впливу на зносостійкість ріжучого інструменту. Це дасть змогу оптимізувати технологічні режими обробки для підвищення експлуатаційних характеристик твердосплавного інструменту. Якість поверхневого шару різального інструменту, що формується в процесі шліфування, істотно впливає на його експлуатаційні характеристики. Особливий інтерес становить вивчення залишкових напружень, що виникають у поверхневому шарі після різних методів шліфувальної обробки. Електроерозійне алмазне шліфування зі змінною полярністю електродів є перспективним методом обробки твердосплавного інструменту, проте вплив цього методу на формування залишкових напружень і зносостійкість інструменту досліджено недостатньо.

Аналіз основних досягнень та літератури. Залишкові напруження класифікуються на дві основні категорії: макроскопічні (напруження першого роду) та мікроскопічні (напруження другого роду). Макронапруження виникають у макрооб'ємах матеріалу та є результатом рівноваги сил у великих масштабах. Мікронапруження, навпаки, формуються між окремими кристалітами або їх групами, а також між різними

© Р.М. Стрельчук, І.О. Рябенков. 2025

фазами матеріалу. Ці напруження можуть мати різний характер і впливати на властивості матеріалу на різних рівнях. Під час шліфування поверхня матеріалу піддається інтенсивному нагріву через тертя. Це призводить до

локального розширення матеріалу, а після охолодження – до утворення залишкових напружень розтягу. Теплові напруження можуть значно впливати на міцність матеріалу, особливо якщо він схильний до утворення тріщин при термічних навантаженнях [1].

Механічне вплив шліфувального інструменту на поверхню матеріалу призводить до пластичної деформації поверхневого шару. Ця деформація сприяє утворенню залишкових напружень стиску. На відміну від теплових напружень, стискуючі напруження можуть покращувати міцність матеріалу, зокрема його стійкість до мікросколювання. Під час шліфування можуть відбуватися фазові перетворення в поверхневому шарі матеріалу, що призводить до зміни його об'єму [2]. Ці зміни також є джерелом залишкових напружень. Однак вплив фазових перетворень на знак і величину напружень залишається неоднозначним і залежить від конкретних умов обробки та властивостей матеріалу.

Залишкові напруження можуть як покращувати, так і погіршувати експлуатаційні характеристики матеріалів, залежно від їх знака та величини. Наприклад, стискуючі напруження підвищують стійкість матеріалу до утворення тріщин і мікросколювання, що особливо важливо для крихких матеріалів, які працюють в умовах знакозмінних навантажень. З іншого боку, напруження розтягу можуть значно знижувати втомустійкість матеріалу, що призводить до передчасного руйнування деталей. У випадку твердих сплавів, таких як ВК6 (сплав на основі карбиду вольфраму та кобальту), залишкові напруження можуть впливати на їх зносостійкість. Більшість дослідників сходяться на думці, що стискуючі напруження покращують зносостійкість інструментів, тоді як значні напруження будь-якого знаку можуть призводити до збільшення зносу. Це пов'язано з тим, що в твердих сплавах, які є гетерофазними матеріалами, формуються як макронапруження, так і мікронапруження між фазами, що ускладнює прогнозування їх впливу на зносостійкість.

Електроерозійне алмазне шліфування є одним із методів обробки твердих сплавів, який відрізняється від традиційного шліфування використанням електричних розрядів для видалення матеріалу. Цей метод дозволяє досягти високої точності обробки та зберегти рельєф ріжучої поверхні інструменту. Однак електроерозійне алмазне шліфування також супроводжується утворенням залишкових напружень у поверхневому шарі матеріалу [3]. Особливістю електроерозійного алмазного шліфування є зміна полярності електродів у зоні різання, що впливає на тепловий та силовий фактори формування залишкових напружень. У порівнянні з алмазно-іскровим шліфуванням, електроерозійне алмазне шліфування характеризується меншою теплонапруженістю, що дозволяє припустити більший вплив силового фактора на формування залишкових напружень. Це може призводити до переважного утворення стискуючих напружень у поверхневому шарі твердого сплаву ВК6.

Методика дослідження. Стан поверхневого шару вивчався в твердосплавних пластинах ВК6 у вихідному стані після спікання та полірування, після електроерозійного та алмазно-іскрового шліфування за таких умов: на заточувальному верстаті моделі 3Д642Е застосовували торцеву схему шліфування, що здійснювали чашковими кругами конічної форми 12А2-45° 150×10×3×32 на зв'язці М1-01 з алмазними зернами АС6, зернистістю 100/80 і концентрацією - 4. Режимі обробки: нормальний тиск $P_n=1,2$ МПа, швидкість круга $V=25$ м/с, амплітуда імпульсу розрядного струму $I=8$ А, частота проходження імпульсів $f=44$ КГц. Модельні зразки піддавалися рентгенівському дослідженню на дифрактометрі ДРОН 2.0 у фільтрованому випромінюванні залізного анода. Дифрактограми реєструвалися поточково через 0,1° з експозицією в кожній точці 10". Розмір областей когерентного розсіювання оцінювали за розширенням ліній за формулою Селякова-Шеррера. Аналіз напруженого стану проводився за допомогою $\sin^2\psi$ –методу. Для зйомок було обрано максимальну лінію за різного кута 2θ . Для кожного зразка було проведено перпендикулярну зйомку та похилі зйомки за $\psi=\pm 30^\circ$ і $\pm 50^\circ$. Рівень залишкових напружень визначали за формулою [4]:

$$\sigma = \frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{d_\psi - d_\perp}{d_\perp} \cdot \frac{1}{\sin^2 \psi} \quad (1)$$

де d_\perp – міжплощинні відстані, виміряні під кутом і по нормалі до поверхні зразка; ψ – кут між нормою до поверхні зразка і відповідною нормою до площин, що відбивають.

У розрахунках прийнято макроскопічні значення пружних постійних: $E=720$ ГПа, $\mu=0,18$. Для характеристики стану поверхневого шару проводили якісний фазовий аналіз, оцінювали розмір областей когерентного розсіювання і рівень (величина і знак) залишкових макронапруг. На рис. 1–3 наведено дифрактограми досліджуваних зразків твердого сплаву ВК6 за різних станів.

За розширенням дифракційних ліній на малих кутах за формулою Селякова-Шеррера [5] визначали розміри областей когерентного розсіювання (рис.4):

$$L_{\text{окр}} = \frac{\lambda}{b \cos \Theta} \quad (2)$$

Для дослідження впливу способів шліфування на зносостійкість різального інструменту проведено стійкісні випробування твердосплавних пластин марки ВК6. Експерименти проводили на токарно-гвинторізному верстаті 16К20 під час точіння без охолодження сірого чавуну марки СЧ20 (НВ180), розміри заготовки $d = 45$ мм, $l = 200$ мм за таких режимів: $V = 100$ м/хв, $S = 0,075$ мм/об, $t = 0,8$ мм. Різці мали такі геометричні параметри: $\gamma = 0^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 45^\circ$. За критерій затуплення було прийнято знос по задній поверхні $h_3 = 0,4$ мм, який вимірювали безпосередньо на верстаті за допомогою мікроскопа "Мир – 2

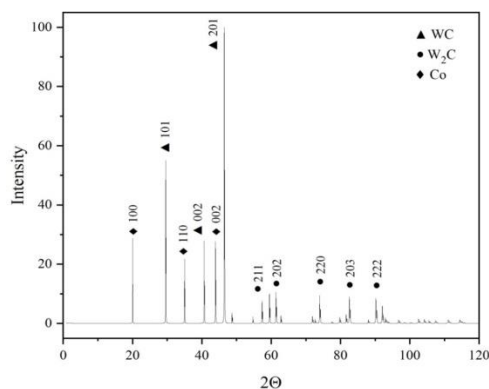


Рис. 1 – Дифрактограма вихідного стану твердого сплаву ВК6

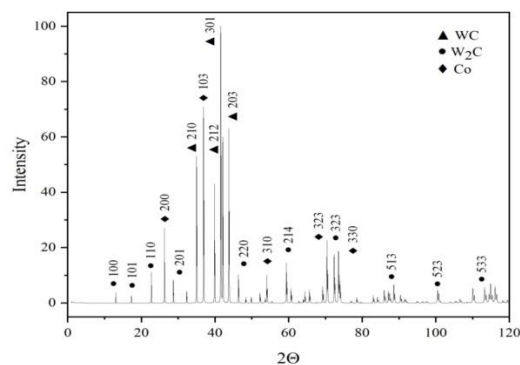


Рис. 2 – Дифрактограма стану твердого сплаву ВК6 після алмазно-іскрового шліфування

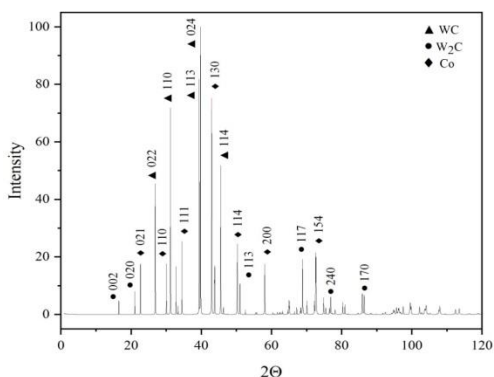


Рис. 3 – Дифрактограма стану твердого сплаву ВК6 після електроерозійного алмазного шліфування

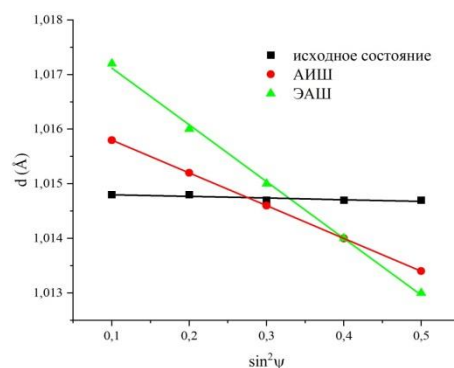


Рис.4 – $\sin^2\psi$ - графіки модельних зразків твердого сплаву ВК6

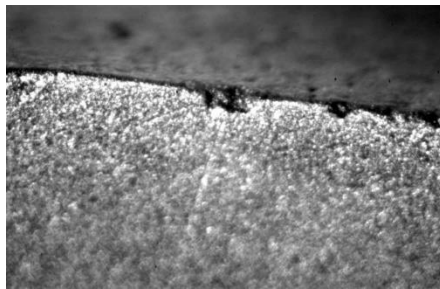
Результати. У результаті розрахунків виявилось, що максимальний розмір області когерентного розсіювання (ОКР) характерний для вихідного зразка твердого сплаву ВК6 – 600 Å, після алмазно-іскрового шліфування розмір ОКР істотно менший – 150 Å, а після електроерозійного алмазного шліфування дещо збільшуються і становить 200 Å. На рис.4 наведені $\sin^2\psi$ – графіки досліджених модельних зразків твердого сплаву. Представлені графіки дають змогу оцінити рівень деформації, а також знак і величину залишкових макронапружень. У результаті розрахунків, виявилось, що найбільші розміри областей когерентного розсіювання характерні для вихідного зразка твердого сплаву ВК6 – 600 Å, після алмазно-іскрового шліфування розміри ОКР істотно менші – 150 Å, а після електроерозійного алмазного шліфування дещо збільшуються і становлять 200 Å.

На рис. 4 наведені $\sin^2\psi$ – графіки досліджених модельних зразків твердого сплаву. Представлені графіки дають змогу оцінити рівень деформації, а також знак і величину залишкових макронапружень. Для вихідного зразка $\sin^2\psi$ – графік являє собою практично пряму лінію паралельну осі $\sin^2\psi$, що свідчить про відсутність макронапруг у дослідженому зразку після спікання. Ті невеликі деформації ($\epsilon = 0,002$ мм) і залишкові стискаючі макронапруження ($\sigma = -0,22$ ГПа) мабуть, викликані поліруванням. Після електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів, виявлені деформації істотно вищі за ($\epsilon = 0,036$ мм), оцінка рівня залишкових стискаючих напружень дає значення $\sigma = -3,8$ ГПа. У зразку після алмазно-іскрового шліфування деформація ($\epsilon = 0,012$), а $\sigma = -1,2$ ГПа. Зниження рівня залишкових макронапруг під час алмазно-іскрового шліфування можна пояснити вищим рівнем температур, що розвиваються в зоні різання. Про це

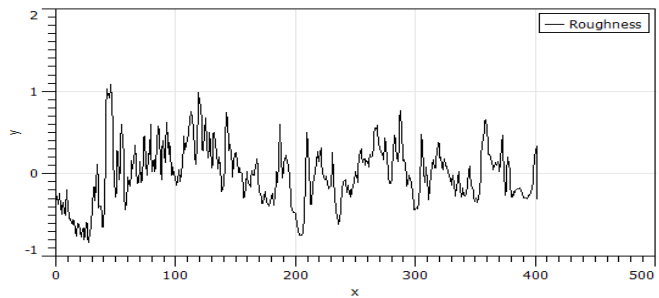
свідчить і збільшення розмірів ОКР. Також інтенсифікація режимів обробки спочатку спричиняє зростання величини стискаючої залишкової деформації, а потім - зниження. Це свідчить про взаємодію двох чинників - силового і теплового - з переважанням силового, що формує стискаючу деформацію [6].

Слід припустити, що залишкові напруження в поверхневому шарі пластин і стійкість цих пластин для ріжучого інструменту мають бути взаємопов'язані, тому були проведені експерименти з визначення стійкості токарних різців [7]. Стійкість різців, оснащених твердосплавними пластинами, оцінюється кількістю оброблених деталей за час періоду стійкості. Недостатня стійкість призводить до зниження продуктивності та додаткових витрат інструментального матеріалу. Тому в цій роботі приділено увагу не тільки підбору режимів різання, а й способам формування та відновлення ріжучої кромки твердосплавного інструменту.

На рис. 5,6 показано мікрофотографію (а) і профілограму (б) поверхні ріжучої кромки твердого сплаву ВК6 після алмазно-іскрового та електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів. У проведених дослідженнях за критерій стійкості різального інструменту прийнято величину фаски зносу по задній поверхні $h_3=0,4$ мм, на підставі рекомендацій чинної нормативної документації.

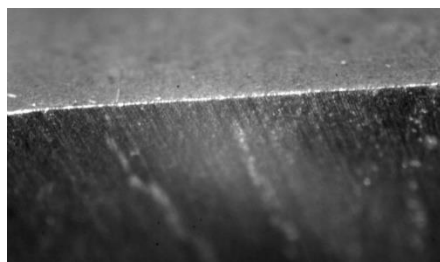


а – Мікрофотографія ріжучої кромки твердого сплаву ВК6

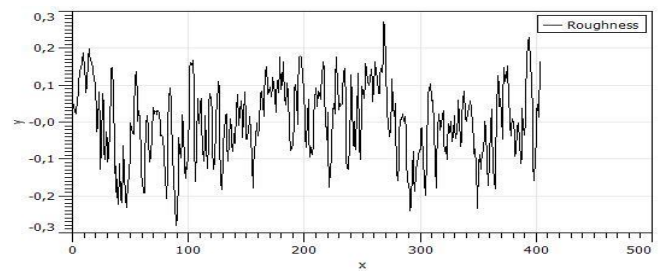


б – Профілограма ріжучої кромки твердого сплаву ВК6 (Ra 2,793 мкм)

Рис.5 – Стан поверхні ріжучої кромки твердого сплаву ВК6 після алмазно-іскрового шліфування



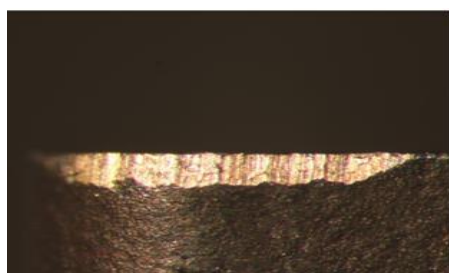
а – Мікрофотографія ріжучої кромки твердого сплаву ВК6



б – Профілограма ріжучої кромки твердого сплаву ВК6 (Ra 0,827 мкм)

Рис. 6 – Стан поверхні ріжучої кромки твердого сплаву ВК6 після електроерозійного шліфування сплаву ВК6 після електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів

На рис.7 показано знос пластин за однакових режимів різання, але різних за часом різання. Результати досліджень показали, що $h_3=0,4$ мм, обраний як критерій стійкості, на пластині після алмазно-іскрового шліфування досягається через 55 хв. Пластина, яку обробили електроерозійним шліфуванням, через такий самий термін роботи зношена на 0,28 мм. Знос $h_3=0,4$ мм пластини після електроерозійного шліфування відбувається через 84 хв. роботи.



а) після алмазно-іскрового шліфування ($h_3=0,4$ мм при $T=55$ хв)



б) після електроерозійного шліфування ($h_3=0,4$ мм при $T=84$ хв)

Рис. 7 Фаска зносу по задній поверхні пластини

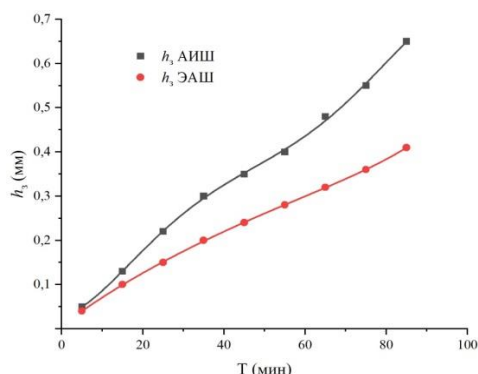


Рис. 8 – Залежність зносу пластини ВК6 від часу точіння.

Таким чином, сумарний час нормального зносу, за який досягається обране значення $h_3=0,4$ мм у заточеній пластини способом електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів вище на 53%. Результати проведених випробувань показано на рис. 8. Вивчено стан поверхневого шару в пластинках ВК6 після алмазно-іскрового та електроерозійного шліфування; виявлено зниження рівня стискальних залишкових макронапруг при алмазно-іскровому шліфуванні, що пояснюється вищим рівнем температур, які розвиваються в зоні різання. Наприклад, після електроерозійного шліфування виявлені деформації істотно вищі за ($\varepsilon = 0,036$ мм) і рівень залишкових стискаючих напружень становить $\sigma = -3,8$ ГПа; після алмазно-іскрового шліфування деформація $\varepsilon = 0,012$ мм, а $\sigma = -1,2$ ГПа.

Висновки. Аналіз представлених результатів під час електроерозійного шліфування показує, що стійкість шліфованих інструментів залежить від залишкових макронапруг, що виникають у поверхневому шарі. Більшим значенням макронапруг стиснення (σ) відповідають вищі значення часу роботи (T) і менша шорсткість поверхні ріжучої кромки порівняно з процесом алмазно-іскрового шліфування.

Таким чином, можна вважати встановленим взаємозв'язок залишкових макронапруг стиснення в процесі електроерозійного алмазного шліфування, який розглядається, зі змінюваною полярністю електродів і стійкістю, виготовлених з нього ріжучих інструментів.

Отже, електроерозійне алмазне шліфування є перспективним методом обробки твёрдосплавного інструменту, оскільки сприяє формуванню сприятливих залишкових напружень у поверхневому шарі, що підвищує його довговічність і зносостійкість. Дослідження цих процесів є важливим для оптимізації технології обробки та покращення експлуатаційних характеристик інструментів.

Список літератури:

1. Electrical Discharge Grinding of Polycrystalline Diamond | Scientific.Net, <https://www.scientific.net/MSF.471-472.457>, last accessed 2025/02/06.
2. Rahim, M.Z., Li, G., Ding, S., Mo, J., Brandt, M.: Electrical discharge grinding versus abrasive grinding in polycrystalline diamond machining—tool quality and performance analysis. *Int J Adv Manuf Technol.* 85, 263–277 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7935-z>.
3. Chen, Y., Zhang, L.C., Arsecularatne, J.A.: Polishing of polycrystalline diamond by the technique of dynamic friction. Part 2: Material removal mechanism. *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* 47, 1615–1624 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.11.003>.
4. Jaensson, B.O.: Residual stresses and stress-strain behaviour of the WC-Co composite material. *Materials Science and Engineering.* 8, 41–53 (1971). [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(71\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(71)90041-3).
5. Zuñega, J.C.P., Gee, M.G., Wood, R.J.K., Walker, J.: Scratch testing of WC/Co hardmetals. *Tribology International.* 54, 77–86 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.02.027>.
6. Yang, J., Roa, J.J., Schwind, M., Odén, M., Johansson-Jõesaar, M.P., Llanes, L.: Grinding-induced metallurgical alterations in the binder phase of WC-Co cemented carbides. *Materials Characterization.* 134, 302–310 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.11.004>.
7. Cruz, D.C., Sordi, V.L., Ventura, C.E.H.: Surface analysis of WC-5%Co cemented tungsten carbide cutting insert after plunge-face grinding. *Int J Adv Manuf Technol.* 108, 323–330 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05382-y>.

References (transliterated):

1. Electrical Discharge Grinding of Polycrystalline Diamond | Scientific.Net, <https://www.scientific.net/MSF.471-472.457>, last accessed 2025/02/06.
2. Rahim, M.Z., Li, G., Ding, S., Mo, J., Brandt, M.: Electrical discharge grinding versus abrasive grinding in polycrystalline diamond machining—tool quality and performance analysis. *Int J Adv Manuf Technol.* 85, 263–277 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7935-z>.
3. Chen, Y., Zhang, L.C., Arsecularatne, J.A.: Polishing of polycrystalline diamond by the technique of dynamic friction. Part 2: Material removal mechanism. *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* 47, 1615–1624 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.11.003>.
4. Jaensson, B.O.: Residual stresses and stress-strain behaviour of the WC-Co composite material. *Materials Science and Engineering.* 8, 41–53 (1971). [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(71\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(71)90041-3).

5. Zuñega, J.C.P., Gee, M.G., Wood, R.J.K., Walker, J.: Scratch testing of WC/Co hardmetals. Tribology International. 54, 77–86 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.02.027>.
6. Yang, J., Roa, J.J., Schwind, M., Odén, M., Johansson-Jöesaar, M.P., Llanes, L.: Grinding-induced metallurgical alterations in the binder phase of WC-Co cemented carbides. Materials Characterization. 134, 302–310 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.11.004>.
7. Cruz, D.C., Sordi, V.L., Ventura, C.E.H.: Surface analysis of WC-5%Co cemented tungsten carbide cutting insert after plunge-face grinding. Int J Adv Manuf Technol. 108, 323–330 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05382-y>.

Надійшла (received) 10.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Стрельчук Роман Михайлович (Strelchuk Roman) – доктор технічних наук, доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-7221-031X>; e-mail: r.m.strelchuk@gmail.com.

Рябенков Ігор Олександрович (Riabenkov Ihor) – кандидат технічних наук, асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем факультету авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету "Харківський авіаційний інститут", м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0009-0006-5375-5089>; e-mail: rigor0212@gmail.com.