

## РОЗДІЛ II. ТЕХНОЛОГІЇ

# МАШИНОБУДУВАННЯ ТА АВТОТРАНСПОРТУ

УДК 621.923.42

DOI: 10.25140/2411-5363-2018-2(12)-59-68

### Віталій Кальченко, Володимир Кальченко, Наталія Сіра, Ярослав Кужельний

#### ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ РІЗАННЯ ОДИНИЧНОГО АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА ПРИБІЛІФУВАННІ ЗІ СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ КРУГА ТА ДЕТАЛІ

*Актуальність теми дослідження.* Процес шліфування є важливим фактором, який впливає на процес формоутворення поверхневого шару деталі.

*Постановка проблеми.* Під час шліфування на кінцевий результат обробки впливають різноманітні фактори, які пов'язані з абразивним інструментом. Ці фактори впливають на величину та напрямок дії сил різання абразивного зерна. Досліджуючи сили різання цього зерна, можна визначити продуктивність процесу шліфування.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* У наукових роботах наведено результати різноманітних експериментальних досліджень процесу шліфування. Проте не було враховано вплив різальних кромок, які деформують деталь. Опубліковані роботи, у яких розглянуто теоретичні основи моделювання алмазно-абразивних інструментів та відсутні детальні дослідження, пов'язані з абразивним інструментом.

*Виділення недосліджених частин загальної проблеми.* Відсутність дослідження впливу деформації деталі різальними крокками абразивного зерна на сили різання під час шліфування.

*Постановка завдання.* Метою цієї статті є дослідження сил різання одиничного абразивного зерна та вплив кромок, які деформують деталь без зняття стружки під час шліфування.

*Виклад основного матеріалу.* Перед початком процесу різання абразивними зернами, відбувається довготривале ковзання ріжучої кромки в місці контакту. Це ковзання супроводжується пластичною деформацією металу. Інші ріжучі кромки в цей час виконують роботу тертя і пружної та пластичної деформації, що відбувається без зняття стружки. Для визначення моменту, коли закінчується пластична деформація і починається зняття стружки, є критерій, який являється відношенням глибини врізання до радіуса заокруглення вершини ріжучої кромки.

*Висновки відповідно до статті.* Уперше, використовуючи 3D-модель процесу шліфування, було досліджено сили різання одиничного абразивного зерна та вплив кромок, які деформують деталь без зняття стружки під час шліфування.

*Ключові слова:* процес шліфування; 3D-модель різання; абразивне зерно; сили різання; орієнтація зерна.

*Рис.:* 12. *Бібл.:* 11.

**Актуальність теми дослідження.** У машинобудівній галузі широко застосовуються циліндричні деталі з високоточними поверхнями. Якість таких поверхонь визначається операціями шліфування.

У процесі виготовлення відповідальних деталей необхідно витримувати високі вимоги щодо якості, що висуваються до геометричних розмірів, шорсткості та фізико-механічного стану поверхневого шару. Разом з цим необхідно підвищувати і продуктивність обробки.

Процес шліфування є одним із фінішних операцій, що забезпечує необхідну якість, точність поверхні та її геометричні параметри.

**Постановка проблеми.** Процес шліфування являє собою складний нестационарний, теплонапружений процес. Складність дослідження цього процесу полягає не тільки в хаотичному розміщенні абразивних зерен шліфувального круга, а й у куті нахилу цього зерна відносно оброблюваної поверхні, радіуса заокруглення вершини ріжучої кромки, глибини врізання та ін. Всі вищезгадані фактори будуть впливати на величину та напрямок сил різання абразивного зерна під час шліфування. Крім цього, певна частина роботи буде витрачатися на пружне та пластичне деформування деталі, а не на знімання стружки. Дослідження даних сил різання дає можливість визначити продуктивність процесу шліфування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі Л. Н. Філімонова [10] наведено результати різноманітних експериментальних досліджень процесу шліфування. Проте не було враховано вплив ріжучих кромок, які деформують деталь. Також у цій роботі сумарна нормальна сила різання визначається як добуток площі абразивного зерна на глибину подачі. У роботі [3] було розглянуто теоретичні основи моделювання алмазно-абразивних інструментів, параметри та класифікація методів формоутворення робочої

поверхні алмазно-абразивних інструментів, закони розподілу розмірів зерен. Також створена система 3D-моделювання алмазно-абразивного інструменту. Проте ці дослідження стосуються більше алмазного інструменту, ніж абразивного.

У роботі [7] були описані основи моделювання процесу різання, використовуючи метод скінченних елементів. Однак відсутні рекомендації щодо створення 3D-моделі процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Відсутність дослідження впливу деформації деталі ріжучими кромками абразивного зерна на сили різання під час шліфування.

**Постановка завдання (мета статті).** Метою цієї статті є дослідження сил різання одиничного абразивного зерна та вплив кромки, які деформують деталь без зняття стружки під час шліфування.

**Виклад основного матеріалу.** На якість формоутворення поверхневого шару обробленої деталі впливає велика кількість фінішних операцій. Найбільш поширеною з цих операцій обробки є шліфування. Дослідженню процесів і явищ, які виникають під час шліфування, була присвячена велика кількість робіт [1; 3; 4; 8; 9; 11].

Перед початком процесу різання абразивними зернами, відбувається доволі довготривале ковзання ріжучої кромки в місці контакту. Це ковзання супроводжується пластичною деформацією металу. Інші ріжучі кромки в цей час виконують роботу тертя та пружної та пластичної деформації, що відбувається без зняття стружки. Для визначення моменту, коли закінчується пластична деформація і починається зняття стружки, є критерій, який являється відношенням глибини врізання до радіуса заокруглення вершини ріжучої кромки ( $a_z / \rho$ ).

Згідно з [6] робота кожної ріжучої кромки під час шліфування витрачається на пластичне і пружне деформування, тертя між абразивним зерном та матеріалом деталі й на подолання інерційних сил, що виникають під час утворення стружки. У роботі [10] зображено схему утворення стружки під час шліфування (рис. 1).

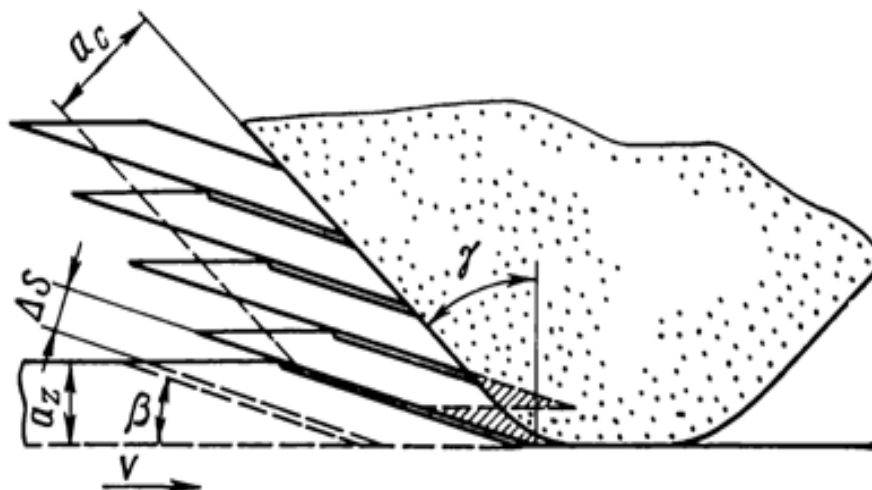


Рис. 1. Схема утворення стружки під час шліфування:

$\beta$  – кут зсуву;  $\gamma$  – передній кут ріжучої кромки;  $a_c$  – товщина стружки;  $a_z$  – глибина врізання;  
 $V$  – швидкість різання;  $\Delta S$  – товщина зони зсуву

Також у роботі [10] було розглянуто, що при визначенні сили різання, яка діє на кожне абразивне зерно, зазвичай розглядають врівноважений стан її складових, враховуючи вплив кожної складової в процесі шліфування. Під час зняття стружки вершиною абразивного зерна діють сили стиснення і зсуву в площині зсуву, тертя й нормального

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

тиску по задній поверхні ріжучої кромки та інерційна сила стружки. Ці складові сили різання зображені у вигляді кругових діаграм (рис. 2).

Нині найбільш поширеним методом дослідження різноманітних механічних обробок деталей є чисельне моделювання. Серед методів чисельних розрахунків найчастіше використовують метод скінченних елементів [5].

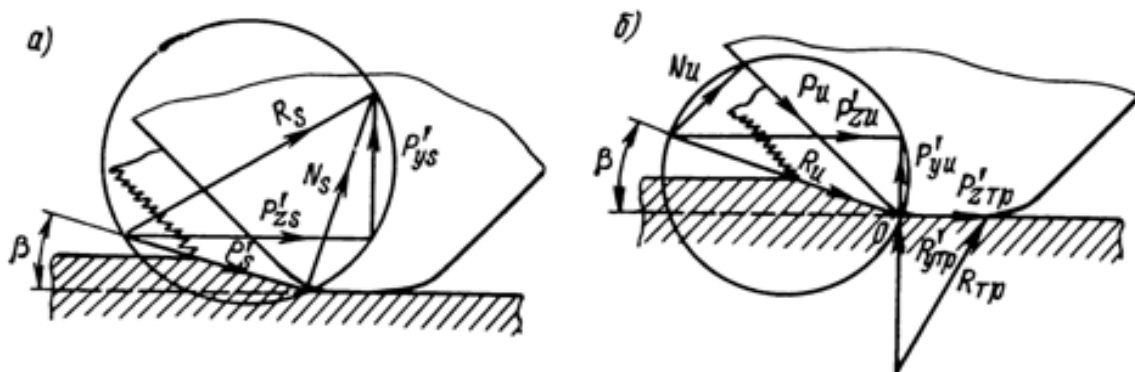


Рис. 2. Кругові діаграми сил зсуву (а), сил інерції та тертя (б), які діють при мікрорізанні одиничним абразивним зерном:

$P'_s$  – сила зсуву;  $P'_{zs}$  – тангенційна складова сили зсуву;  $P'_{ys}$  – радіальна складова сили зсуву;  
 $N_s$  – нормальна сила в площині зсуву;  $R_s$  – рівнодійна сили зсуву;  $R_{mp}$  – сила тертя;  $P'_{ymp}$  – нормальна складова сили тертя;  $P'_{zmp}$  – тангенційна складова сили тертя;  $P'_u$  – сила інерції;  $P'_{zu}$  – тангенційна складова сили інерції;  $P'_{yu}$  – радіальна складова сили інерції;  $R_u$  – рівнодійна сили інерції;  
 $N_u$  – нормальна складова сили інерції

Для створення 3D-моделі різання одиничним абразивним зерном (рис. 3, а), було застосовано комп'ютерне моделювання та результати досліджень, що наведені у роботі [7].

У роботі Л. Н. Філімонова [10] наведено зображення риски, яка утворена мікрорізанням заготовки зі сталі P18 (рис. 3, б).

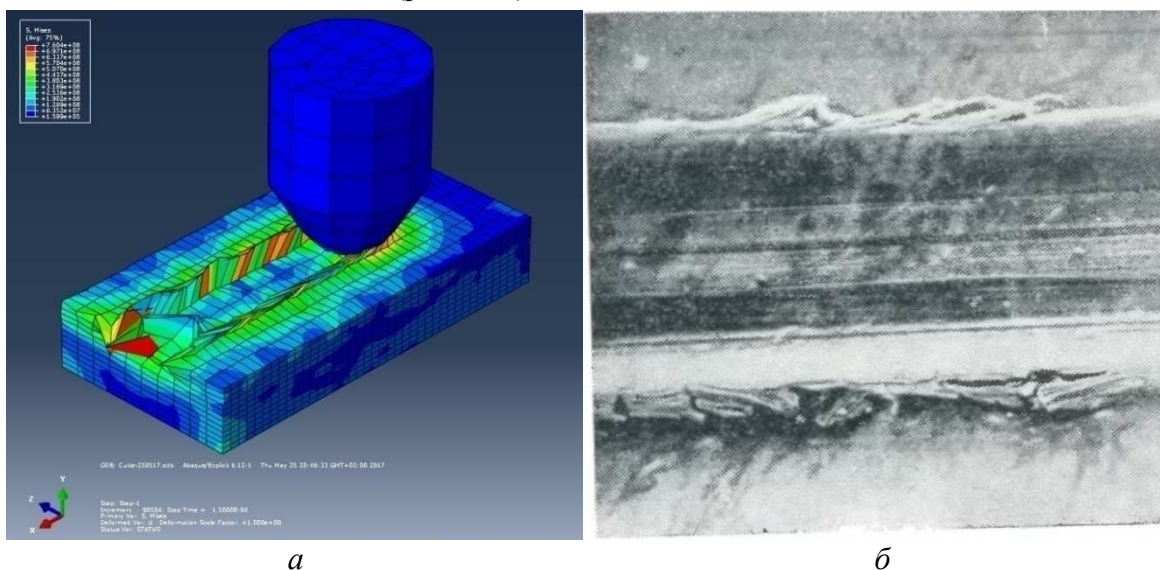


Рис. 3. Порівняння результатів експерименту процесу різання одиничним абразивним зерном та створеної 3D-моделі

У зазначеній роботі [10] проводилось експериментальне дослідження лише різальних зерен, які розташовувались перпендикулярно до оброблюваної поверхні й у яких корисна

робота витрачалась на знімання шару стружки. Згідно з роботою А. К. Байкалова [1], зазвичай існує три положення зерна відносно деталі: перпендикулярне, повздожне та поперечне (рис. 4–6). Робота тих зерен, що мають несприятливе розміщення у шліфувальному крузі, буде витрачатися на знос зерна, деформацію деталі та перетворення в теплову енергію.

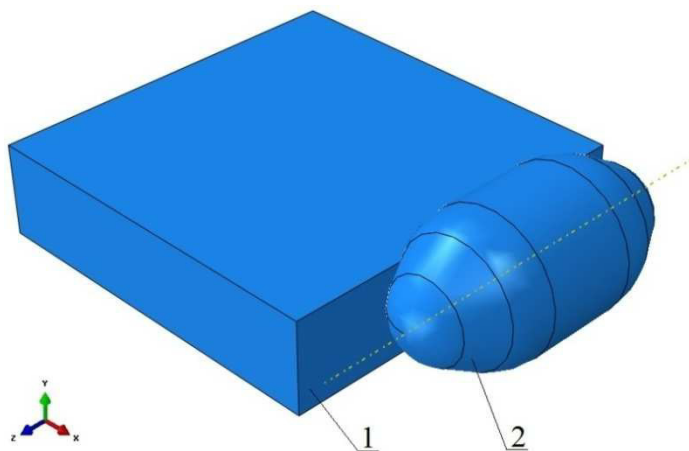


Рис. 4. Поперечне розміщення абразивного зерна відносно оброблюваної деталі:  
1 – оброблювана деталь; 2 – абразивне зерно

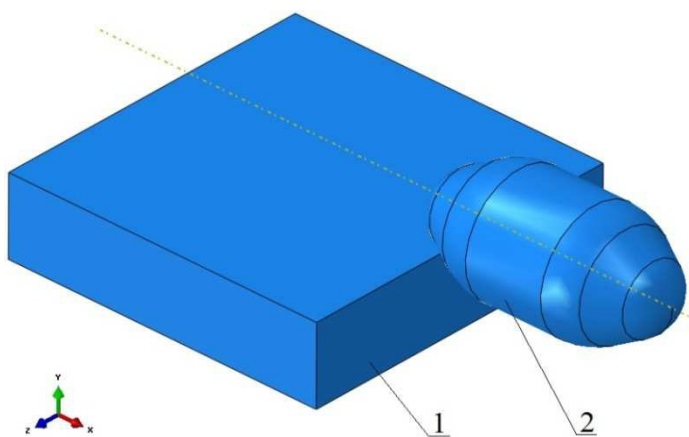


Рис. 5. Повздожне розміщення абразивного зерна відносно оброблюваної деталі:  
1 – оброблювана деталь; 2 – абразивне зерно

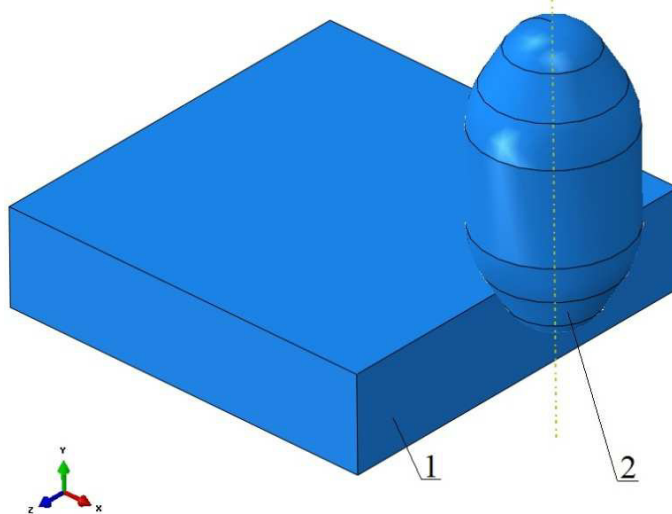


Рис. 6. Перпендикулярне розміщення абразивного зерна відносно оброблюваної деталі:  
1 – оброблювана деталь; 2 – абразивне зерно

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

При виробництві абразивних шліфувальних кругів вже існує певна кількість потенційно різальних зерен.

Процес шліфування є нестабільним у зв'язку зі зміною профілю шліфувального круга під час роботи. Згідно з роботою А. К. Байкалова [1], лише  $\frac{1}{3}$  від загальної кількості зерен, що розташовані у шліфувальному крузі, буде витратитися на різання деталі. Робота іншої частини зерен буде витратитися на пружну та пластичну деформації деталі, тертя та перетворення в теплову енергію.

Під час процесу шліфування відбувається різання деталі абразивними зернами. Після виходу цих зерен із місця контакту із заготовкою залишаються риси з боковими напливами (рис. 3). Якщо наступні зерна, які врзатимуться в деталь, будуть мати затуплені кромки, великі радіуси заокруглення та несприятливу орієнтацію відносно поверхні деталі, то буде відбуватися деформація деталі з можливим ущільненням поверхневого шару або незначне знімання матеріалу деталі з підвищенням температури. На рис. 7 зображена схема робочої поверхні шліфувального круга.

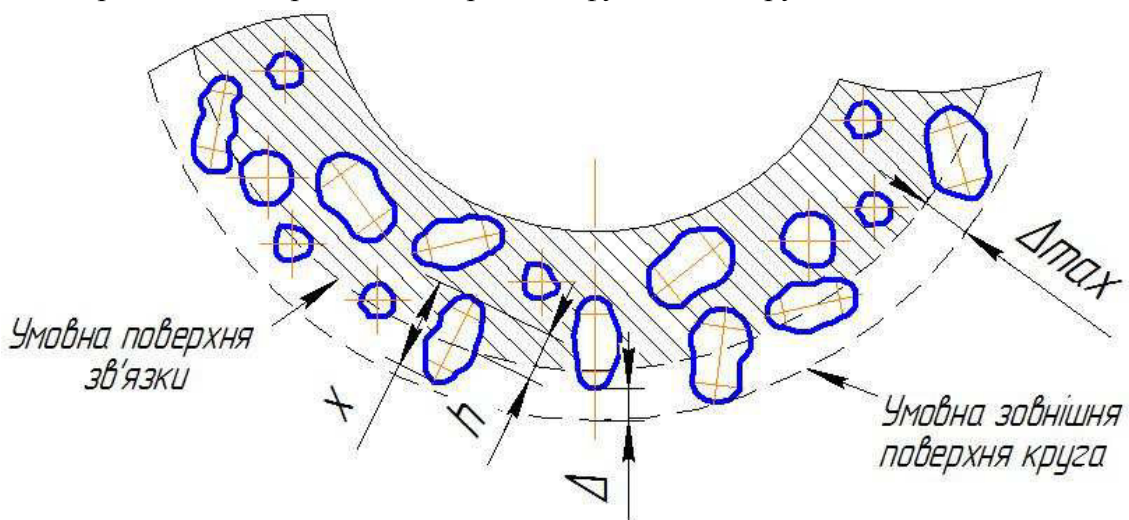


Рис. 7. Схематичне зображення робочої поверхні шліфувального круга:  
 $\Delta_{max}$  – зовнішня поверхня круга;  $\Delta$  – висота зерна;  $h$  – глибина закріплення зерна;  $x$  – розмір зерна

На ті абразивні зерна, які контактують з деталлю під час шліфування, відбувається різноманітний силовий та тепловий впливи. Результатом такого впливу можуть бути: стирання вершин різальних кромки, викришування частинок абразивних зерен, виривання абразивних зерен зі зв'язки. На рис. 8 схематично зображено поверхню шліфувального круга після певного часу шліфування.

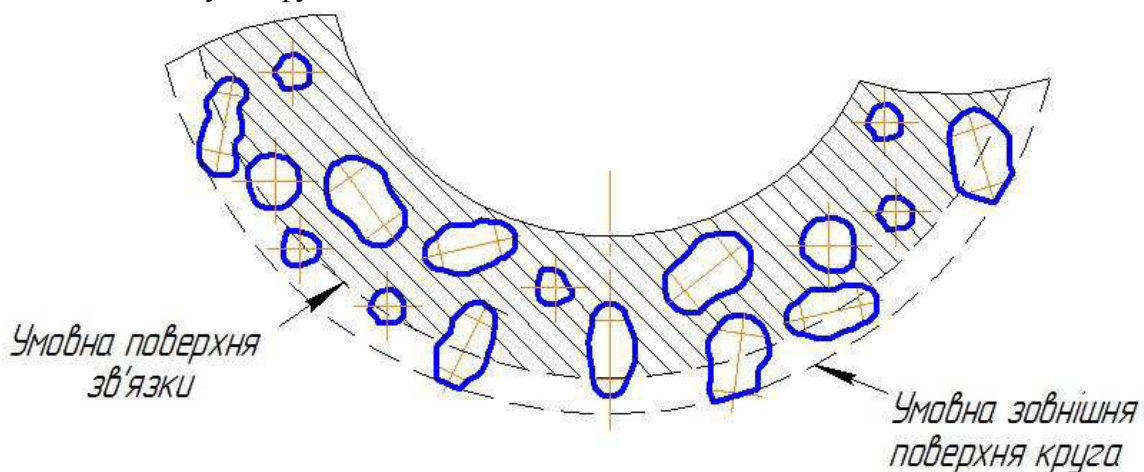


Рис. 8. Поверхня шліфувального круга після певного часу шліфування

Під час шліфування на абразивні зерна круга також може наліплюватися метал від оброблюваної деталі. Вищезгадані явища погіршують різальні властивості круга та призводять до збільшення сили різання й температури шліфування та в кінцевому результаті до погіршення якості та точності обробки.

Для відновлення різальних властивостей круга його необхідно правити або проводити процес шліфування в режимі самозагострювання. Це дозволить зняти дефектний шар із круга, сприятиме появі нових гострих різальних кромки та нових абразивних зерен. Крім цього, правка також відновлює геометричну форму круга.

Під час роботи шліфувального круга в режимі самозатуплення відбувається затуплення тих абразивних зерен, які мають максимальний виліт, проте не відбувається виривання цих зерен зі зв'язки. Радіус заокруглення зерен починає збільшуватись і буде відбуватись лише деформування деталі без різання. Це, у свою чергу, призводить до виникнення підвищених вібрацій та шуму. Величина амплітуди коливання вимірюється датчиком абсолютного коливання, а шум – віброакустичним методом. Якщо вчасно не виявити цей процес, то зерна з великими радіусами заокруглення будуть вдарятись об деталь та викликати прижоги. Якщо вчасно не провести правку круга, то поверхневий шар деталі буде мати дефекти, які у свою чергу негативно впливають на якість та точність деталі. Здебільшого правка круга проводиться за допомогою алмазного олівця.

Після правки круга на його поверхні з'являються нові різальні зерна. У перші секунди роботи круга після правки, ті зерна, які мають малий заділ у зв'язці, вириваються й у роботу вступають нові різальні зерна.

Робота круга в режимі самозагострювання характеризується тим, що у різальних зернах буде зменшуватись заділ у зв'язці, і вони будуть вириватись. Після виривання цих зерен та викришування певної кількості зв'язки, на профілі круга з'являються нові різальні зерна. Такий режим роботи є самовідновлювальним.

На рис. 9 зображено поверхню шліфувального круга після правки.

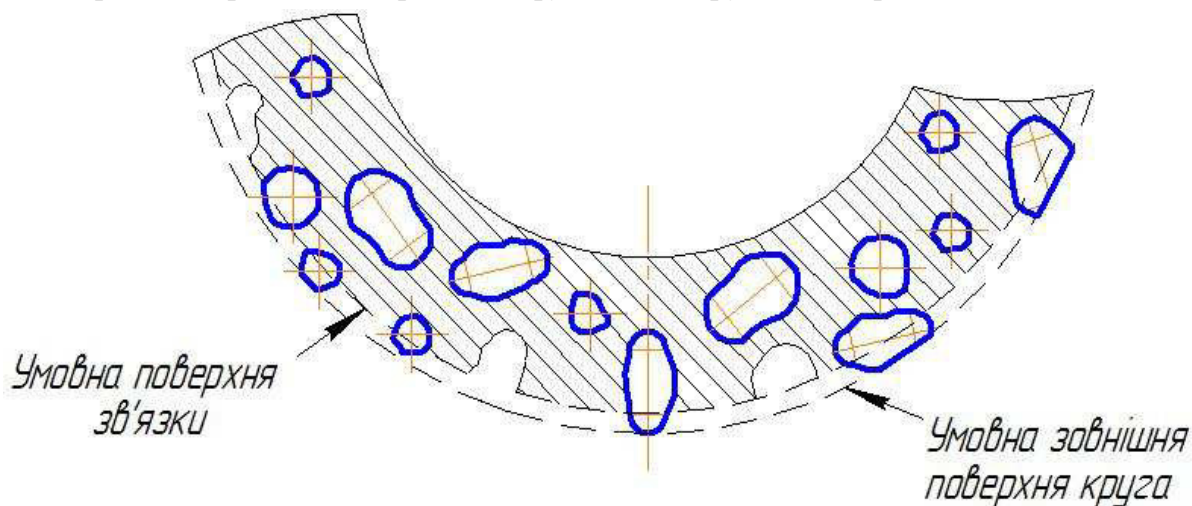


Рис. 9. Поверхня шліфувального круга після правки

У роботах [2; 6] було визначено силу різання у відповідних точках абразивного зерна. Сумарні сили різання від різальних та деформуючих кромки, які перенесені на профіль абразивного зерна, зображені на рис. 10. Переріз абразивного зерна, в якому визначались сили різання та проекція сил різання від різальних та деформуючих кромки вздовж відповідного перерізу абразивного зерна, зображені на рис. 11 та 12.

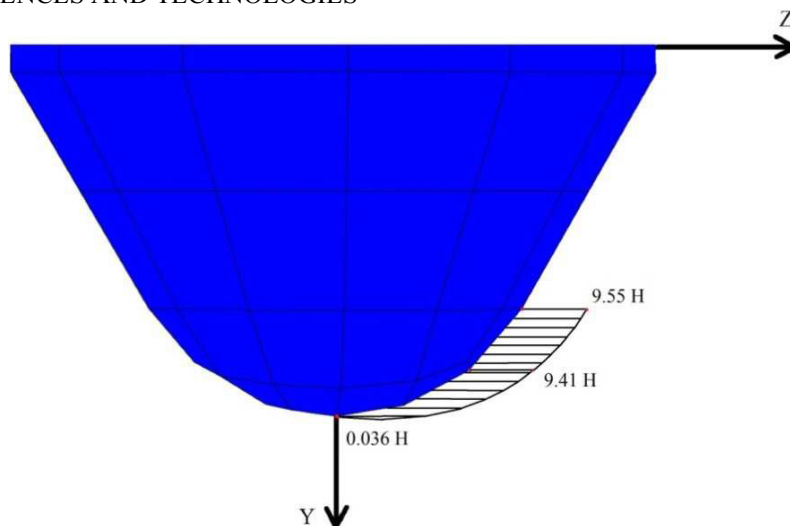


Рис. 10. Сумарні сили різання від різальних та деформуючих кромки вздовж профілю абразивного зерна

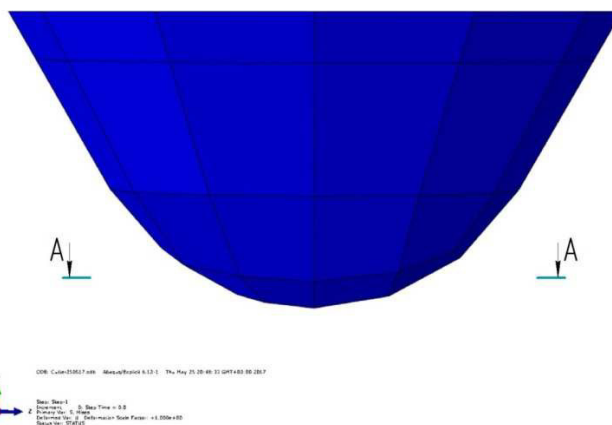


Рис. 11. Переріз абразивного зерна, в якому визначались сили різання (вид спереду)

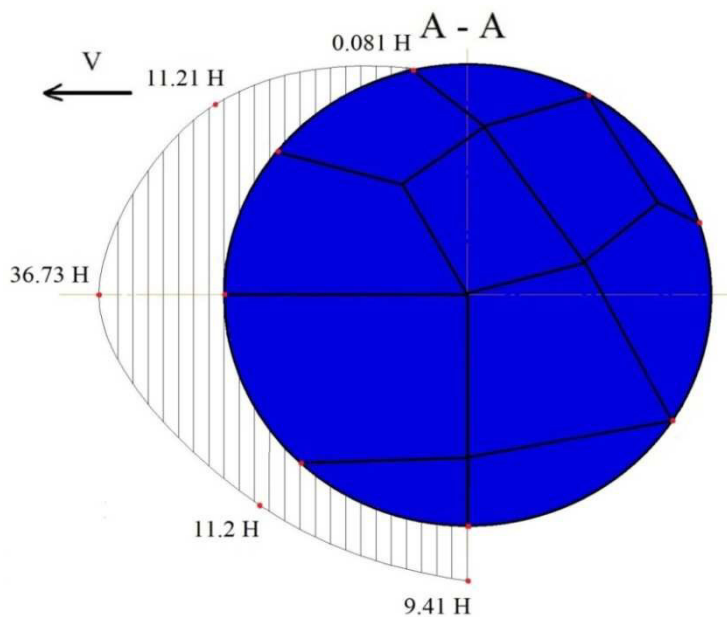


Рис. 12. Проекція сил різання від різальних та деформуючих кромки вздовж відповідного перерізу абразивного зерна

Залежно від етапу різання круга в деталь, різальні кромки абразивного зерна будуть виконувати як роботу пластичного і пружного деформування, так і роботу різання. Вся корисна робота різального зерна буде витратитися не тільки на зрізання шару металу, а й на утворення бокових напливів. Після різання одним абразивним зерном ці напливи будуть новим припуском для наступних зерен, які врізаються в деталь.

**Висновки відповідно до статті.** Уперше, використовуючи 3D-модель процесу шліфування, було досліджено сили різання одиничного абразивного зерна та вплив кромок, які деформують деталь без зняття стружки під час шліфування. Визначено, що максимальна сила різання буде в точках, які перші починають врізатися в деталь та збігаються з віссю напрямку руху зерна, а з боків цього зерна буде відбуватися лише деформування деталі. Також встановлено, що мінімальна величина сили різання буде в точці, що відповідає вершині абразивного зерна. Ця точка виконує роботу тертя та деформування без різання.

#### Список використаних джерел

1. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов / А. К. Байкалов. – К. : Наукова думка, 1978. – 207 с.
2. Визначення сумарної сили різання одиничним абразивним зерном при шліфуванні зі схрещеними осями круга та деталі / В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, Я. В. Кужельний, Д. В. Кальченко // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2017. – № 12. – С. 20–30.
3. Грабченко А. И. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования : учебное пособие / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович. – Х. : НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с.
4. Грабченко А. И. Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали : монография / А. И. Грабченко, В. И. Кальченко, В. В. Кальченко. – Чернигов : ЧДТУ, 2009. – 256 с.
5. Дубенець В. Г. Основи методу скінченних елементів : навчальний посібник / В. Г. Дубенець, В. В. Хільчевський, О. В. Савченко. – Чернігів : ЧДТУ, 2007. – 348 с.
6. Кальченко В. Моделювання процесу різання одиничним абразивним зерном при круглomu глибинному шліфуванні / В. Кальченко, О. Деркач, Я. Кужельний // Технічні науки та технології. – 2017. – № 2 (8). – С. 29–39.
7. Криворучко Д. В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы : монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залого. – Сумы : Университетская книга, 2012. – 496 с.
8. Основы теории резания материалов : учебник / Н. П. Мазур, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Залого, Ю. К. Новоселов, Ф. Я. Якубов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Х. : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.
9. Резников А. Н. Абразивная и алмазная обработка материалов : справочник / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1977. – 391 с. : ил.
10. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Л. : Машиностроение, 1979. – 248 с. : ил.
11. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1975. – 175 с.

#### References

1. Baikalov, A. K. (1978). *Vvedenie v teoriyu shlifovaniia materialov [Introduction to the theory of grinding materials]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
2. Kalchenko, V. I., Kalchenko, V. V., Kuzhelnyi, Ya. V., Kalchenko, D. V. (2017). Vyznachennia sumarnoi syly rizannia odynychnym abrazyvnyym zernom pry shlifuvanni zi skhreshchenymy osiamy kruha ta detail [Determination of the total force of cutting by a single abrasive grain when grinding with crossed axes of a circle and a part]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni – Modern technology in mechanical engineering*, 12, 20–30 [in Ukrainian].
3. Grabchenko, A. I., Dobroskok, V. L., Fedorovych V. A. (2006). *3D-modelirovaniealmazno-abrazivnykh instrumentov i protsessov shlifovaniia [3D-modeling of diamond-abrasive tools and grinding processes]*. Kharkiv: NTU «KhPI» [in Russian].



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

4. Grabchenko, A. I., Kalchenko, V. I. & Kalchenko, V. V. (2009). *Shlifovanie so skreshhivaiushchimisia osiami instrumenta i detail [Grinding with crossed axes of tool and workpiece]*. Chernihiv: ChDTU [in Russian].
5. Dubenets, V. H., Khilchevskiy, V. V., Savchenko, O. V. (2007). *Osnovy metodu skinchennykh elementiv [Fundamentals of finite element method]*. Chernihiv: ChDTU [in Ukrainian].
6. Kalchenko, V. I., Derkach, O. L., Kuzhelnyi, Ya. V. (2017). Modeliuvannia protsesu rizannia odynychnym abrazivnym zernom pry kruhlomu hlybynnomu shlifuvanni [Simulation of the cutting process by single abrasive grain at round deep grinding]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 2(8), 29–39 [in Ukrainian].
7. Kryvoruchko, D. V., Zaloha, V. A. (2012). *Modelirovanie protsessov rezaniia metodom konechnykh elementov: metodologicheskie osnovy [Simulation of the cutting process using finite element method: methodological bases]*. Sumy: Universitetskaia kniga [in Russian].
8. Mazur, N. P., Vnukov, Iu. N., Grabchenko, A. I., Dobroskok, V. L., Zaloga, V. A., Novoselov, Iu. K. & Jakubov, F. Ia. (2013). *Osnovy teorii rezaniia materialov: [Fundamentals of the theory of cutting materials]*. Kharkiv: NTU «KhPI» [in Ukrainian].
9. Reznikov, A. N. (1977). *Abrazivnaia i almaznaia obrabotka materialov: spravochnik [Abrasive and diamond processing of materials. Directory]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
10. Filimonov, L. N. (1979). *Vusokoskorostnoe shlifovanie [High-speed grinding]*. Leningrad: Mashinostroenie [in Russian].
11. Iakimov, A. V. (1975). *Optimizatsiia protsesa shlifovaniia [Optimization of the grinding process]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

UDC 621.923.42

Vitalii Kalchenko, Volodymyr Kalchenko, Nataliia Sira, Yaroslav Kuzhelnyi

**RESEARCH OF THE CUTTING FORCES OF A SINGLE ABRASIVE GRAIN WHEN GRINDING WITH CROSSED AXES OF A CIRCLE AND A PART**

**Urgency of the research.** The grinding process is an important factor that affects the process of forming the surface layer of the detail.

**Target setting.** During the grinding, the various factors associated with the abrasive tool are influenced by the final result of the treatment. These factors influence the size and direction of the cutting forces of abrasive grain. Researching the cutting forces of this grain, it is possible to determine the productivity of the grinding process.

**Actual scientific researches and issues analysis.** In scientific works the results of various experimental research of the grinding process are presented. However, the effect of cutting edges that deformed the part was not taken into account. The paper deals with the theoretical foundations of diamond - abrasive tools modeling and lack of detailed research related to the abrasive tool.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The absence of a research of the effect of the deformation of the parts by the cutting edges of the abrasive grain on the cutting forces during the grinding.

**The research objective.** The purpose of this article is to research the cutting forces single abrasive grains and the effect of edges that deform the part without removing the chips when grinding.

**The statement of basic materials.** Before the cutting process begins with abrasive grains, there is a long slip of the cutting edge at the place of contact. This slip is accompanied by plastic deformation of the metal. Other cutting edges, at this time, carry out the work of friction and elastic and plastic deformation, which occurs without the removal of chips. To determine the moment when the plastic deformation ends and the shaving is started, there is a criterion that is the ratio of the cutting depth to the radius of rounding the vertex of the cutting edge.

**Conclusions.** For the first time, using the 3D model of the grinding process, the cutting forces single abrasive grains and the effect of edges that deform the part without removing the chips when grinding were researched.

**Keywords:** grinding process; 3D model of cutting; abrasive grain; cutting forces; orientation of the grain.

Fig.: 12. References: 11.

УДК 621.923.42

Виталий Кальченко, Владимир Кальченко, Наталия Серая, Ярослав Кузельный

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ЕДИНИЧНОГО АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА ПРИ ШЛИФОВАНИИ СО СКРЕЩЁННЫМИ ОСЯМИ КРУГА И ДЕТАЛИ**

**Актуальность темы исследования.** Процесс шлифования является важным фактором, влияющим на процесс формообразования поверхностного слоя детали.

**Постановка проблемы.** Во время шлифования на конечный результат обработки влияют различные факторы, связанные с абразивным инструментом. Данные факторы влияют на величину и направление действия сил резания абразивного зерна. Исследуя силы резания данного зерна, можно определить производительность процесса шлифования.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В научных работах приведены результаты различных экспериментальных исследований процесса шлифования. Однако не было учтено влияние режущих кромок, которые деформируют деталь. Опубликованные работы, в которых рассмотрены теоретические основы моделирования алмазно-абразивных инструментов и отсутствуют детальные исследования, связанные с абразивным инструментом.

**Выделение неисследованных частей общей проблемы.** Отсутствие исследования влияния деформации детали режущими кромками абразивного зерна на силы резания при шлифовании.

**Постановка задачи.** Целью данной статьи является исследование сил резания единичного абразивного зерна и влияние кромок, деформирующих деталь без снятия стружки при шлифовании.

**Изложение основного материала.** Перед началом процесса резания абразивными зернами, происходит длительное скольжение режущей кромки в месте контакта. Это скольжение сопровождается пластической деформацией металла. Другие режущие кромки в это время выполняют работу трения и упругой и пластической деформации, которая происходит без снятия стружки. Для определения момента, когда заканчивается пластическая деформация и начинается снятия стружки, существует критерий, который является отношением глубины врезания к радиусу закругления вершины режущей кромки.

**Выводы в соответствии со статьёй.** Впервые, используя 3D-модель процесса шлифования, были исследованы силы резания единичного абразивного зерна и влияние кромок, деформирующих деталь без снятия стружки при шлифовании.

**Ключевые слова:** процесс шлифования; 3D-модель резания; абразивное зерно; силы резания; ориентация зерна.

Рис.: 12. Библ.: 11.

**Кальченко Віталій Іванович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Кальченко Виталий Иванович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

**Kalchenko Vitalii** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** kalchenkovi@ukr.net

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9850-7875>

**ResearcherID:** G-9477-2014

**Кальченко Володимир Віталійович** – доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Кальченко Владимир Витальевич** – доктор технических наук, профессор, проректор по научно-педагогической работе, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

**Kalchenko Volodymyr** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific-Pedagogical Work, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** vvkalchenko74@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9072-2976>

**ResearcherID:** G-6752-2014

**Сіра Наталія Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, доценткафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Серая Наталья Николаевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

**Sira Nataliia** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** nnseraya@ukr.net

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3248-0593>

**ResearcherID:** K-2658-2017

**Кужельний Ярослав Володимирович** – аспірант кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Кужельный Ярослав Владимирович** – аспирант кафедры автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14035, Украина).

**Kuzhelnyi Yaroslav** – PhD student of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** k.y.v.immortal@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5269-8557>

**ResearcherID:** J-1127-2016