

**Кужельний Я.В.**

Чернігівський національний технологічний університет

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ОДИНИЧНИМ АБРАЗИВНИМ ЗЕРНОМ ПІД ЧАС ШЛІФУВАННЯ

*Проаналізовано методи дослідження процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування. Наведено основні фактори, які впливають на процес мікрорізання. Розглянуто результати експериментальних досліджень та моделювань процесів різання. Зображено 3D модель різання одиничним абразивним зерном під час шліфування. Наведені епюри навантаження від різальних та деформуючих кромки абразивного зерна.*

**Ключові слова:** процес різання, 3D модель, абразивне зерно, шліфування, моделювання.

**Постановка проблеми.** Для забезпечення необхідних параметрів точності та якості оброблюваної деталі застосовують різні фінішні способи обробки. Найпоширенішим із способів є процес шліфування. Цей процес є нестационарним та теплонапруженим. На процес шліфування впливає велика кількість факторів: розміщення абразивних зерен у шліфувальному крузі, кут орієнтації даних зерен відносно деталі, радіус заокруглення вершини ріжучої кромки, глибина врізання в деталь тощо. Дані фактори ускладнюють дослідження процесу шліфування. Окрім цього, сили різання теж будуть мати різний напрямок та величину. Також певна частина загальної роботи буде витрачатися на пластичне і пружне деформування матеріалу заготовки, а не на знімання поверхневого шару деталі. Аналіз методів дослідження процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування сприятиме підвищенню ефективності фінішної обробки деталей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [1] наведені теоретичні основи моделювання алмазно-абразивних інструментів, їхні параметри та класифікація методів формоутворення робочої поверхні, закони розподілу розмірів зерен, створена методологія 3D моделювання алмазно-абразивних інструментів. Також наведена велика кількість рекомендацій для вивчення процесу алмазного шліфування. Проте в даній роботі велика увага була приділена вивченню саме процесу алмазного шліфування, а не абразивного. У роботі [2] розглянуті основні відомості про механіку та кінематику процесу шліфування. Наведені експериментальні результати мікрорізання одиничним абразивним зерном, механізм утворення стружки, утворення шліфувальних рисок, закон розподілу різальних кромки. Проте в роботі не досліджено процес деформування деталі

різальними кромками інструменту. У роботі [3] наведені методологічні основи побудови моделей різання з використанням методів скінченних елементів. Розглянуті визначальні рівняння оброблювальних матеріалів, прогнозування термомеханічної моделі процесу стружоутворення під час різання металів. Також наведені принципи практичного застосування скінченно-елементних моделей для дослідження та оптимізації робочих процесів різання тощо. Однак відсутні теоретичні та практичні рекомендації застосування вищезгаданих моделей для створення 3D моделі різання одиничним абразивним зерном під час шліфування пластичних матеріалів. У роботах [4, 5] наведені методики визначення сил різання під час шліфування зі схрещеними осями деталі та інструменту, але відсутній аналіз процесу деформації деталі під час шліфування.

**Постановка завдання.** Метою роботи є аналіз методів дослідження процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування, що своєю чергою дасть можливість підвищити продуктивність та ефективність фінішної обробки деталей.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Згідно з дослідженням [2] під час шліфування різання зернами виконується не всіма ріжучими кромками робочої поверхні інструмента, а тільки тими, що знаходяться над зв'язкою круга. Не всі різальні кромки, що контактують з деталлю, будуть знімати стружку. Цей процес будуть виконувати тільки ті абразивні зерна, які мають необхідну форму округлення вершини та глибину врізання в деталь.

Перед початком зйому поверхневого шару деталі абразивними зернами відбувається доволі довготривале ковзання різальної кромки в місці контакту. Це ковзання супроводжується пластичною деформацією матеріалу деталі. Інші різальні

кромки в цей час виконують роботу тертя і пружної та пластичної деформації. Цей процес відбувається без зняття стружки. Для визначення моменту, коли закінчується пластична деформація і починається процес різання абразивними зернами, існує критерій, який представляє собою відношення глибини врізання до радіусу заокруглення вершини різальної кромки ( $a_z/\rho$ ). Згідно з цим на формування поверхневого шару деталі також будуть впливати пластичне та пружне деформування, а не лише сам процес різання. Під час процесу шліфування певна частина роботи кожної ріжучої кромки витрачається на пластичне і пружне деформування, тертя між інструментом та деталлю та на подолання інерційних сил під час стружкоутворення.

Відповідно до роботи [2] схема стружкоутворення під час шліфування зображена на рис. 1.

Згідно з [2] під час визначення сили різання, яка діє на кожне абразивне зерно шліфувального круга, розглядають врівноважений стан її складників, враховуючи їх вплив під час процесу шліфування. В момент зняття припуску деталі вершиною абразивного зерна діють сили стиснення і зсуву в площині зсуву, тертя і нормального тиску по задній поверхні ріжучої кромки та інерційна сила стружки. Дані складники сили різання зображені у вигляді кругових діаграм (рис. 2).

Поверхня деталі після шліфування являє собою результат накладання шліфованих рисок, які утворені вершинами абразивних зерен (рис. 3).

На процес різання під час шліфування великий вплив має прийнята форма абразивного зерна. Найчастіше за максимально можливі форми абразивних зерен приймають еліпс, конус, трьохвісний еліпсоїд, циліндр, призму, піраміду та інші.

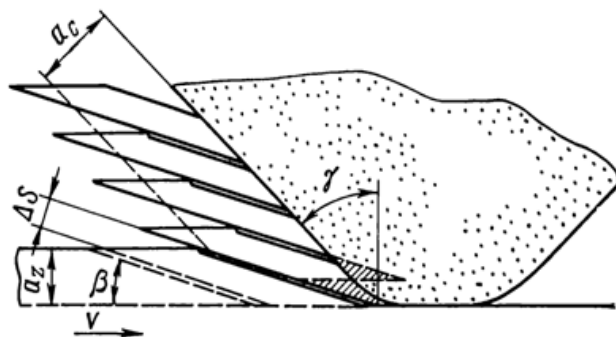


Рис. 1. Схема стружкоутворення під час шліфування:

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

Згідно з [1] форма зерна приймається у вигляді трьохвісного еліпсоїда та за статичного моделювання прийнято наступні припущення:

- 1) кожне окреме зерно являє собою трьохвісний еліпсоїд;
- 2) розподіл розмірів діаметрів еліпсоїда за кожною із вісей відповідає нормальному закону розподілу.

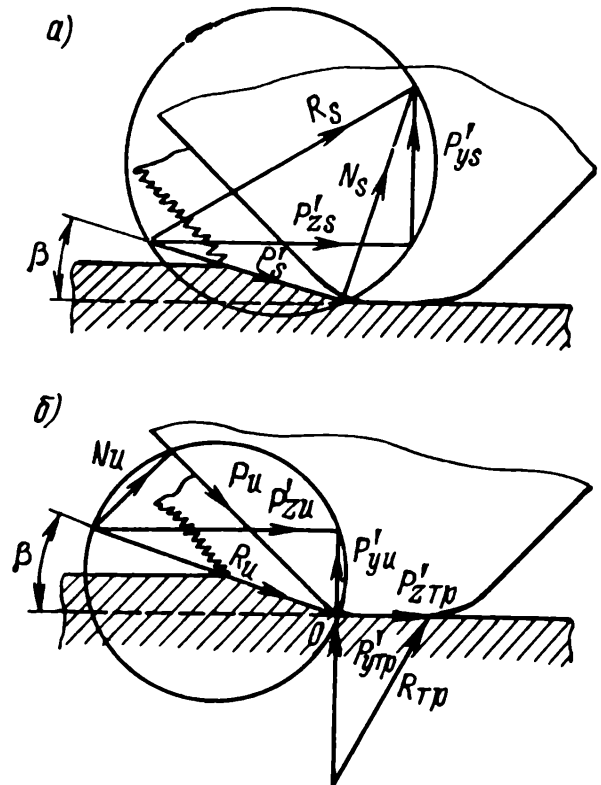


Рис. 2. Кругові діаграми сил зсуву (а), сил інерції та тертя (б), які діють при мікрорізанні одиничним абразивним зерном:

$P'_{zs}$  – сила зсуву;  $P'_{ys}$  – тангенційний складник сили зсуву;  $P'_{ys}$  – радіальний складник сили зсуву;  $N_s$  – нормальна сила в площині зсуву;  $R_s$  – рівнодійна сили зсуву;  $R_{mp}$  – сила тертя;  $P'_{ytp}$  – радіальний складник сили тертя;  $P'_{ztp}$  – тангенційний складник сили тертя;  $P_u$  – сила інерції;  $P'_{zu}$  – тангенційний складник сили інерції;  $P'_{yu}$  – радіальний складник сили інерції;  $R_u$  – рівнодійна сили інерції;  $N_u$  – нормальний складник сили інерції

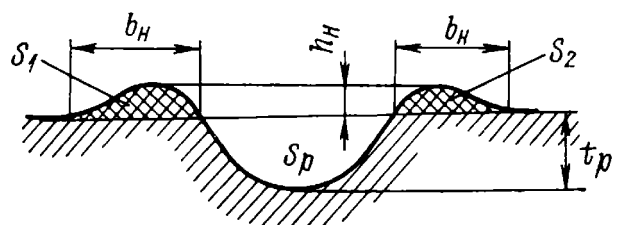


Рис. 3. Поперечний профіль шліфувальної риски із напливами:

$S_1, S_2$  – площа напливів;  $S_p$  – площа риски;  
 $b_n$  – ширина напливів;  $h_n$  – висота напливу;  
 $t_p$  – глибина шліфувальної риски

У вищезгаданій роботі, використовуючи результати розрахунків, було створено 3D модель робочої поверхні круга (рис. 4).

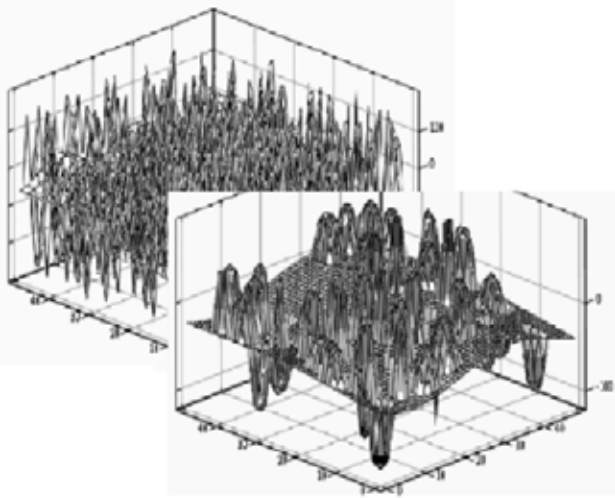


Рис. 4. 3D модель робочої поверхні круга

У роботі [3] стверджується, що, застосовуючи комп'ютерне моделювання, можливо створити віртуальну модель процесів різання із великою кількістю вхідних даних, оптимізувати його та змодельовати нові процеси механічної обробки.

Такий метод може спрогнозувати напружено-деформований стан інструменту та деталі, процес стружкоутворення, форму обробленої поверхні деталі, проекції та величини сил різання, розподіл температури тощо.

Використовуючи високошвидкісну відеозйомку, можливо порівняти результати

комп'ютерного моделювання процесу різання деталі з реальним експериментом (рис. 5).

У роботі [6] для дослідження розмірів, форми та геометрії абразивних зерен прийнято наступні припущення:

- 1) абразивні зерна приводять до форми кулі одного радіусу;
- 2) абразивні зерна замінюють еліпсоїдом обертання з постійним співвідношенням напіввісей;
- 3) виступаючі різальні вершини зерен замінюють еквівалентним конусом або пірамідою (із заокругленням або без заокруглення вершини);
- 4) поперечний переріз абразивного зерна розглядають як неправильний багатокутник, який отримується із правильної фігури (ромб або паралелограм) шляхом сколу у них однієї або декількох вершин.

Для дослідження процесу різання одиничним абразивним зерном зазвичай розглядаються три положення зерна відносно деталі: повздовжнє, поперечне та перпендикулярне (рис. 6). Розміщення даних зерен відносно деталі буде впливати на продуктивність процесу шліфування, оскільки їхнє нераціональне розташування буде призводити до витрати частини роботи на пружне та пластичне деформування заготовки без знімання стружки та на перетворення в теплову енергію.

Використовуючи результати розрахунків у роботах [7, 8] та довідкові матеріали з [9], була створена 3D модель процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування пластичних матеріалів (рис. 7).

Також було зображено епюру навантаження від різальних та деформуючих кромок вздовж

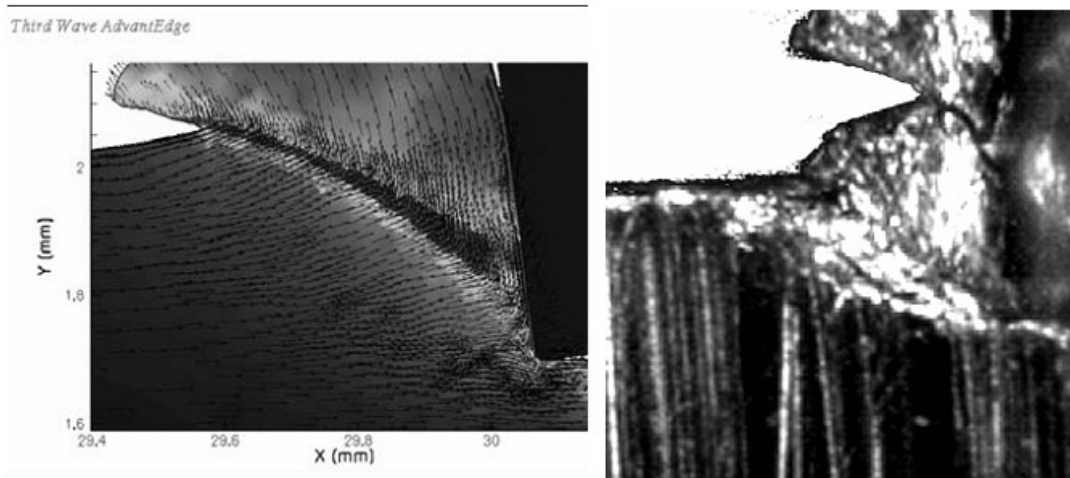


Рис. 5. Порівняння результатів моделювання елементного стружкоутворення (а) та високошвидкісної відеозйомки (б)

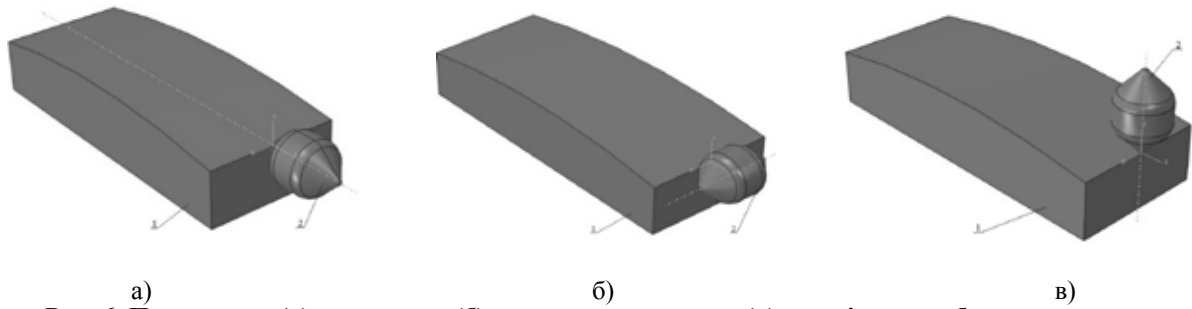


Рис. 6. Повздовжнє (а), поперечне (б) та перпендикулярне (в), розміщення абразивного зерна відносно деталі: 1 – деталь; 2 – абразивне зерно

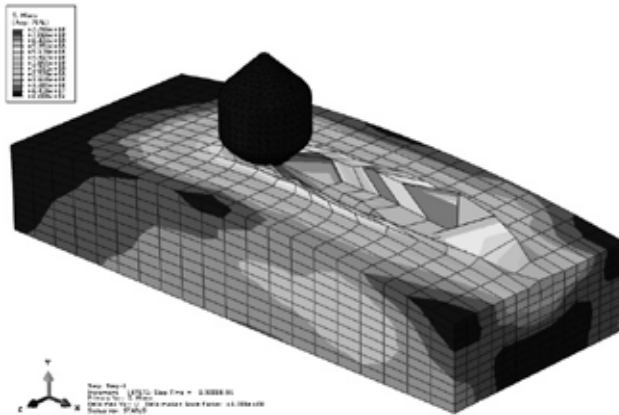


Рис. 7. 3D модель процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування пластичних матеріалів

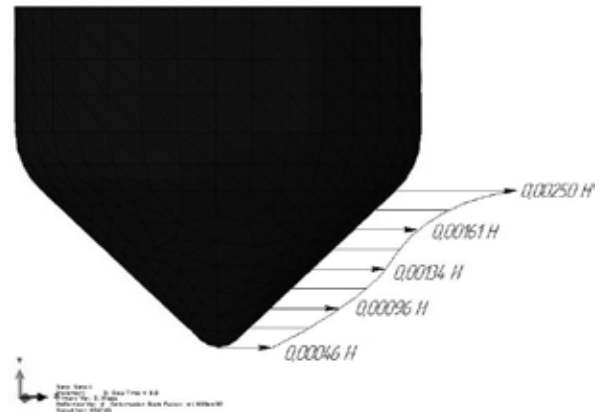


Рис. 8. Епюра навантаження від різальних та деформуючих кромek вздовж профілю абразивного зерна

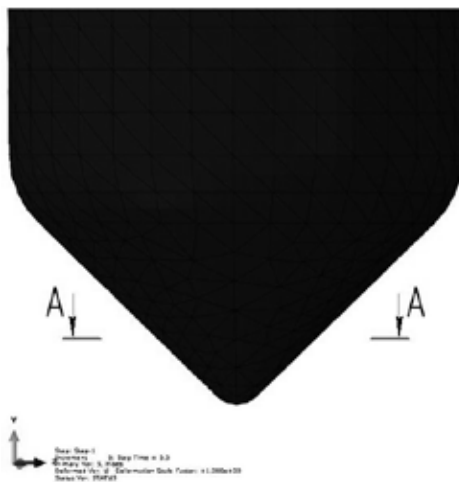


Рис. 9. Переріз абразивного зерна, в якому визначалась епюра навантаження від різальних та деформуючих кромek

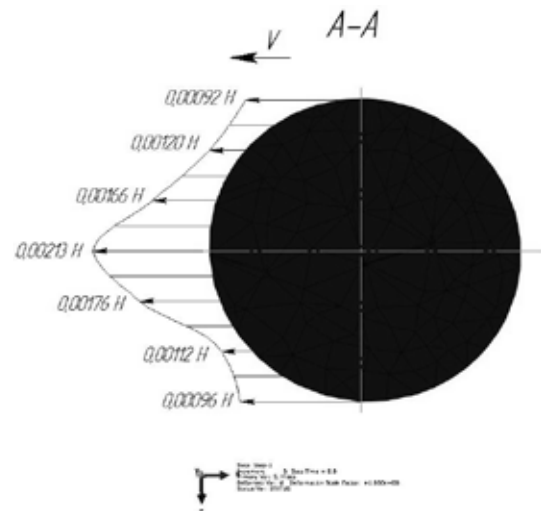


Рис. 10. Епюра навантаження від різальних та деформуючих кромek у відповідному перерізі абразивного зерна

профілю абразивного зерна (рис. 8). Окрім цього, у відповідному перерізі абразивного зерна (рис. 9) була зображена епюра навантаження від різальних та деформуючих кромek (рис. 10). У даному випадку згідно з епюрою навантаження (рис. 10) точка, у якій виникає максимальна величина навантаження, першою врізається в деталь.

Для моделювання різноманітних процесів різання існує велика кількість програмного забезпечення: ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS, DEFORM тощо. Проте комп'ютерне моделювання різноманітних процесів різання порівняно з реальними експериментами має достатньо велику похибку. До причин, які призводять

до виникнення похибок, можна віднести недосконалість алгоритмів моделювання процесів та недостатня достовірність вхідних даних.

Для усунення даних похибок можливе застосування оптимальних та достовірних вхідних даних, використання найбільш сприятливих моделей, які описують різноманітні процеси під час різання, зменшення кількості факторів, які впливають на кінцеву похибку моделювання.

**Висновки.** У роботі проаналізовано різноманітні методи дослідження процесу різання одним абразивним зерном під час шліфування. Встановлено, що одними із основних факторів, які безпосередньо впливають на процес різання,

є геометрична форма та кут орієнтації зерна відносно деталі.

До сучасних методів дослідження процесу різання одним абразивним зерном належить комп'ютерне моделювання та створення 3D моделей. Хоча даний спосіб і має певні недоліки, але майбутнє більш детальне дослідження процесів обробки і розвиток комп'ютерного моделювання значно підвищать точність та достовірність змодельованих процесів із реальними.

Отже, застосування комп'ютерного моделювання та створення 3D моделей процесів різання є перспективними методами дослідження.

### Список літератури:

1. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования : Учебное пособие. Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. 364 с.
2. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Ленинград : Машиностроение, 1979, 248 с., ил.
3. Криворучко Д.В., Залога В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы : монография. Сумы : Университетская книга, 2012. 496 с.
4. Volodymyr Kalchenko, Andriy Yeroshenko, Sergiy Boyko, Nataliia Sira. Determination of cutting forces in grinding with crossed axes of tool and workpiece. *Acta mechanica et automatica*. 2017. №1 (11). P. 58–63.
5. Кальченко В.И., Погиба Н.Н., Кальченко Д.В. Определение составляющих силы резания при глубинном шлифовании поверхностей вращения ориентированным эльборовым кругом. *Сверхтвердые материалы*. Киев : Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2012. № 2 (196). С. 58–73.
6. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. Київ : Наукова думка, 1978. 207 с.
7. Кальченко В.І., Деркач О.Л., Кужельний Я.В. Моделювання процесу різання одним абразивним зерном при круглому глибинному шліфуванні. *Технічні науки та технології*. 2017. № 2 (8). С. 29–39.
8. Кальченко В.І., Кальченко В.В., Сіра Н.М., Кужельний Я.В. Дослідження сил різання одного абразивного зерна при шліфуванні зі схрещеними осями круга та деталі. *Технічні науки та технології*. 2018. №2 (12). С. 59–68.
9. Резников А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. Москва : Машиностроение, 1977. 391 с. с ил.

### АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ЕДИНИЧНЫМ АБРАЗИВНЫМ ЗЕРНОМ ВО ВРЕМЯ ШЛИФОВАНИЯ

*Проанализированы методы исследования процесса резания единичным абразивным зерном во время шлифования. Приведены основные факторы, влияющие на процесс микрорезания. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований и моделирования процессов резания. Изображена 3D модель резания единичным абразивным зерном во время шлифования. Приведенные эпюры нагрузки от режущих и деформирующих кромок абразивного зерна.*

**Ключевые слова:** процесс резания, 3D модель, абразивное зерно, шлифование, моделирование.

### ANALYSIS OF THE CUTTING PROCESS RESEARCH METHODS WITH A SINGLE ABRASIVE GRAIN DURING GRINDING

*Analyzed the methods of researching the process of cutting a single abrasive grain during grinding. The main factors affecting the process of microcutting are given. The results of experimental research and modeling of cutting processes are considered. A 3D model of cutting with a single abrasive grain is shown during grinding. The diagrams of the load from the cutting and deforming edges of the abrasive grain are given.*

**Key words:** cutting process, 3D model, abrasive grain, grinding, modeling.