

УДК 621.923

Ю.В.Петраков, Н.А.Кравець

НТУ України «Київський політехнічний інститут»

МОДЕЛЮВАННЯ УТВОРЕННЯ ХВИЛЯСТОСТІ І ОГРАНОВУВАННЯ ПОВЕРХНІ ПРИ ПЛОСКОМУ ШЛІФУВАННІ

У статті представлена математична модель динамічних явищ при плоскому шліфуванні, яка враховує вплив перехідних процесів і дисбалансу шліфувального круга на формування. Розроблена прикладна програма, яка моделює процес шліфування і дозволяє вивчати вплив різних параметрів технологічної оброблювальної системи на утворення хвилястості або ограновування обробленої поверхні.

Актуальність. Плоске шліфування широко застосовується у сучасному машинобудуванні для фінішних операцій виготовлення напрямних верстатів та пристроїв, площин рознімання корпусів коробок швидкостей, редукторів та насосів, робочих поверхонь лемешів та інших деталей сільськогосподарських машин тощо. Тому до операцій плоского шліфування виставляються високі вимоги як за точністю розміру, так і за формою (площинністю) обробленої поверхні.

Звичайно операції плоского шліфування можна поділити на обдирні, попередні та завершальні. Обдирне шліфування забезпечує досить високу точність оброблення (8-9 квалітету) і шорсткість поверхні $Ra=2,5-5,0$ мкм, попереднє шліфування забезпечує точність 6-9 квалітету і шорсткість $Ra=1,2-2,5$ мкм, а на операціях завершального шліфування досягається точність 5-6 квалітету і шорсткість поверхні $Ra=0,2-1,2$ мкм.

Не зважаючи на високі технологічні можливості плоского шліфування процес характеризується суттєвою нестаціонарністю, що викликана періодичним входом і виходом шліфувального круга із зони різання, що приводить до коливань технологічної оброблюваної системи (ТОС) і як наслідок утворення хвилястості і огранки оброблюваної поверхні. Причому коливання ТОС приводять не тільки до викривлення геометричної форми оброблюваної поверхні, а й до утворення припалів у місцях збільшення глибини різання під час коливань. Крім того, на утворення таких дефектів впливає також і дисбаланс шліфувального круга, що також провокує коливання ТОС, які накладаються на коливання, викликані перехідними процесами при різанні [1].

Таким чином, проблема підвищення якості операцій плоского шліфування шляхом управління динамічними параметрами ТОС є актуальною науково-технічною задачею.

Постановка задачі. Коливання, що виникають під час різання, відбуваються у пружній ТОС, яка є замкненою системою і у першому наближенні може бути представлена у вигляді еквівалентної пружної системи як одномасової, з урахуванням зворотних зв'язків. Формування обробленої поверхні виконується через взаємодію шліфувального круга із заготовкою і в залежності від геометричних і динамічних параметрів ТОС може викликати її хвилястість або огранку.

Метою даної роботи є розроблення математичної моделі процесу плоского шліфування, яка адекватно відображає динамічні явища, що відбуваються в реальній ТОС і дозволяє оцінити вплив всіх головних параметрів процесу на утворення хвилястості, з'ясувати причини і умови переходу хвилястості в огранку, запропонувати методи усунення таких негативних явищ.

Вирішення задачі. Для складання математичної моделі необхідно розробити функціональну модель процесу плоского шліфування, що відповідає умовам задачі, які були викладені вище. Виходячи з технологічної схеми виконання операції плоского шліфування вирішено формувати модель за напрямком однієї координати – глибини різання, яка в решті-решт і формує перетин плоскої поверхні деталі, що обробляється. Саме за таким напрямком вимірюється на практиці відхилення від площинності обробленої поверхні у вигляді хвилястості або огранки. Зрізування частини припуску (у відповідності до глибини різання H_{ϕ}) характеризується швидкістю зрізування Q_{ν} або її аналогом Q і розраховується за геометричною взаємодією вихідної інструментальної поверхні шліфувального круга із заготовкою (рис.1).

©Ю.В. Петраков, Н.А. Кравець

Процес різання, що характеризується швидкістю зрізування припуску, викликає силову реакцію, яка може бути представлена складовою сили різання в напрямку нормальної до поверхні деталі координатою, тобто складовою P_y . Еквівалентна пружна система (ЕПС) в напрямку координати Y знаходиться під дією силового збудження від складової P_y сили різання і періодичної сили інерції P_{in} від дисбалансу шліфувального круга. Силовое збудження викликає пружну деформацію δ ЕПС, яка, в наслідок замкненості ТОС, впливає на задану глибину H_z різання і перетворює її на фактичну глибину H_ϕ різання, яка, в свою чергу, визначається взаємним розташуванням центру шліфувального круга і заготовки, тобто відстанню між формоутворюючою траєкторією і заготовкою.

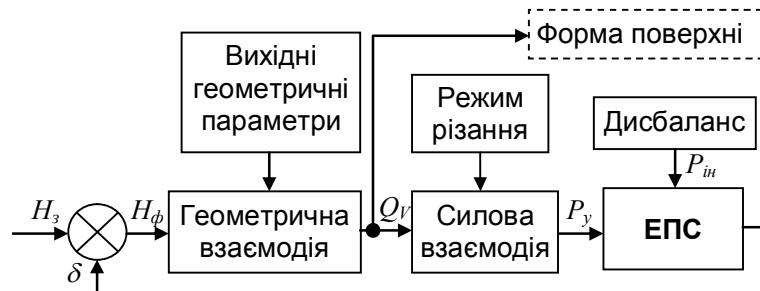


Рис.1. Функціональна схема

Тепер, коли виділені всі складові блоки функціональної схеми процесу і з'ясовані зв'язки між ними, необхідно скласти математичні моделі цих блоків.

Оскільки математична модель процесу шліфування є суто нелінійною і буде використовуватись для моделювання на ЕОМ, тому найбільш доцільно зразу використовувати чисельні методи для математичного представлення функціонування деяких блоків на функціональній схемі.

Отже, блок геометричної взаємодії представлений чисельною процедурою, що автоматично, під час моделювання визначає координати точок входу і виходу периферії шліфувального круга в зону різання при будь-якому положенні його центру в ході коливань ТОС. Така процедура добре себе зарекомендувала при вирішенні плоских задач взаємодії інструмента і заготовки [2] і дозволяє визначити головну характеристику процесу шліфування – аналог швидкості зрізування припуску (рис.2). Крім того, в процедуру визначення точок входу і виходу периферії шліфувального круга в зону різання входить процедура перерахунку профілю заготовки, що утворився на поточному кроці моделювання. Завдяки цьому в процесі моделювання автоматично утворюється профіль заготовки, утворений периферією шліфувального круга який визначає форму поверхні деталі.

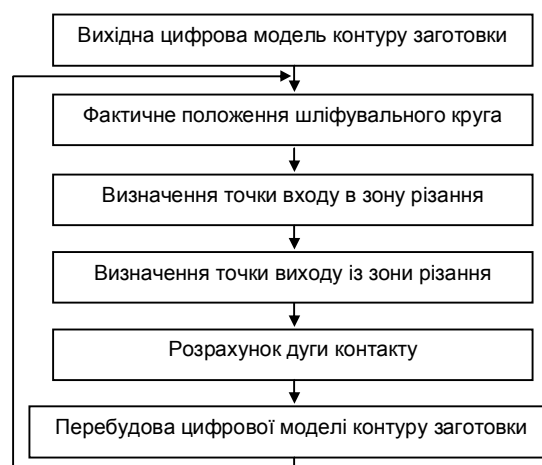


Рис.2. Алгоритм чисельної процедури моделювання геометричної взаємодії

Слід зауважити, що обов'язковою умовою функціонування такого алгоритму є попереднє представлення профілю заготовки у вигляді двомірного цифрового масиву, тобто у формі дискретної геометричної моделі.

Остаточно швидкість зрізування припуску (мм³/хв.) визначається за формулою [3]:

$$Q_V = \frac{L_k^2}{2} \cdot S_n, \quad (1)$$

де L_k – дуга контакту, мм, S_n – поздовжня подача, мм/хв.

Для складання математичної моделі блока силової взаємодії необхідно скористатися схемою розташування векторів сили різання та її складових (рис.3). На схемі показана взаємодія шліфувального круга 1 з заготовкою 2, яка представлена дискретною геометричною моделлю. Ураховуючи наявність коливань та замкненість ТОС, фактична глибина різання H_ϕ може відрізнятись від заданої H_z , як у бік збільшення, так і у бік зменшення, що і відображене на схемі.

Шліфувальний круг здійснює різання за дугою контакту АВ і при цьому утворюється сила різання P , яку можна розкласти на дві складові: радіальну P_r і окружну P_o . Окружна складова визначається за емпіричною залежністю [2]:

$$P_o = C_p \cdot (Q_V)^\alpha \cdot B, \quad (2)$$

де C_p , α – емпіричні коефіцієнт і показник ступеня, Q_V – швидкість зрізування припуску, B – ширина різання.

З геометричних побудов схеми розташування векторів складових сили різання можна отримати співвідношення між кутами, що визначають їх положення:

$$\alpha_2 = \frac{\varepsilon}{2} - \varphi_1, \quad (3)$$

де ε – кут контакту шліфувального круга і заготовки.

Отже, з урахуванням співвідношення між окружною і радіальною складовими сили різання $P_r = 2.5P_o$ та $\alpha_3 = \alpha_1 - \alpha_2 = \arctan(n) + \varphi_1 - \varepsilon/2$, отримаємо формулу для розрахунку складової P_y сили різання:

$$P_y = 2,69 \cdot P_o \cdot \cos\left(1,19 + \varphi_1 - \frac{\varepsilon}{2}\right). \quad (4)$$

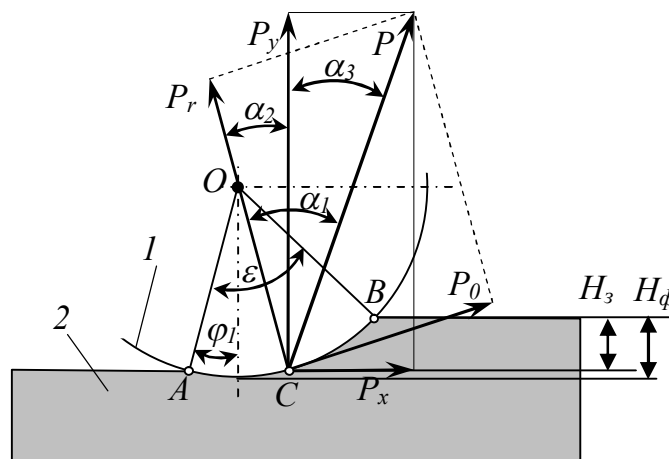


Рис.3. Складові сили різання при плоскому шліфуванні

У відповідності до функціональної схеми (дивись рис.1) на ЕПС діє збурення у вигляді сили інерції від дисбалансу шліфувального круга. Сила P_{in} інерції від дисбалансу може бути визначена за формулою:

$$P_{in} = \omega^2 \cdot db \cdot \cos(\omega t), \quad (5)$$

де ω – частота обертання круга (рад/с), db – дисбаланс (кг·м).

Частота обертання круга пов'язана зі швидкістю V_p різання (м/с) і діаметром D_k круга (мм) відомою залежністю:

$$\omega = \frac{\pi 1000 V_p}{60 D_k} \quad (6)$$

Математична модель ЕПС в першому наближенні може бути представлена одномасовою динамічною системою за координатою y , нормальною до оброблюваної поверхні, а силове збурення у вигляді складової P_y сили різання з урахуванням постійної часу T_p стружкоутворення процесу різання та сили P_{in} інерції від дисбалансу шліфувального круга. Таким чином, математична модель представляється у вигляді диференціального рівняння третього порядку:

$$T_p \frac{dP_y}{dt} + P_y + P_{in} = m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda \frac{dy}{dt} + cy, \quad (7)$$

де m , λ , c – приведена маса, коефіцієнт в'язкого тертя і приведена жорсткість ЕПС відповідно.

Використовуючи отримані математичні моделі можна отримати передатні функції відповідних блоків функціональної схеми ТОС (дивись рис.1) та скласти структурну схему, яка представлена на рис.4.

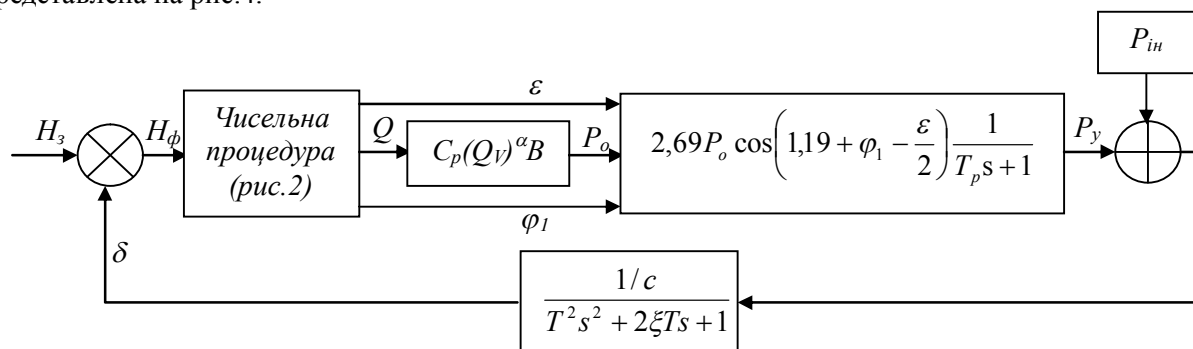


Рис.4. Структурна схема ТОС плоского шліфування

На структурній схемі для ЕПС використана її передатна функція, що була отримана зі стандартної форми представлення математичної моделі (7), з наступними позначеннями: $T = \sqrt{c/m}$ – постійна часу системи, $\xi = \lambda/(2Tc)$ – коефіцієнт затухання коливань.

Моделювання. Для проведення досліджень динамічних явищ, що супроводжують процес плоского шліфування та встановлення залежностей утворення хвилястості поверхні від основних параметрів ТОС, а також умов переходу хвилястості в огранку була розроблена прикладна програма, в якій використана математична модель, що була представлена вище.

Зліва на інтерфейсі прикладної програми (рис.5) представлені віконця для введення вихідних даних про динамічні параметри ТОС, геометричні параметри та дисбаланс інструменту, параметри режиму різання. Внизу, зліва, знаходяться кнопки управління, призначення яких впливає з відповідних написів. Справа розташовані графічні вікна з анімаційним зображенням процесу формоутворення (вгорі) та віртуальний осцилограф (внизу) для виведення на екран осцилограм складової P_y сили різання та глибини різання у функції часу.

Оскільки сучасні плоскошліфувальні верстати (наприклад, фірми Studer) оснащуються системами ЧПК і регульованими приводами повздовжньої подачі та головного руху, проведені дослідження залежності геометричних параметрів хвилястості саме від цих складових режиму різання. Хвилястість обробленої поверхні може характеризуватися кроком і висотою, також суттєвий вплив на експлуатаційні характеристики обробленої поверхні і навіть зовнішній вигляд має форма хвилястості, коли вона переходить в огранку. Моделювання проводилося при невеликому первинному дисбалансі шліфувального круга (50 г·см) та всіх інших незмінних параметрах, що введені у вікна інтерфейсу прикладної програми.

На рис.5 представлений стан інтерфейсу при дослідженні залежності форми обробленої поверхні від швидкості різання в обраному діапазоні: рис.5, а – швидкість різання 20 м/с, рис.5, б – 40 м/с. У вікнах інтерфейсу лінія 1 – форма обробленої поверхні, лінія 2 – вихідна

інструментальна поверхня шліфувального круга, лінія 3 – глибина різання, лінія 4 – складова P_y сили різання.

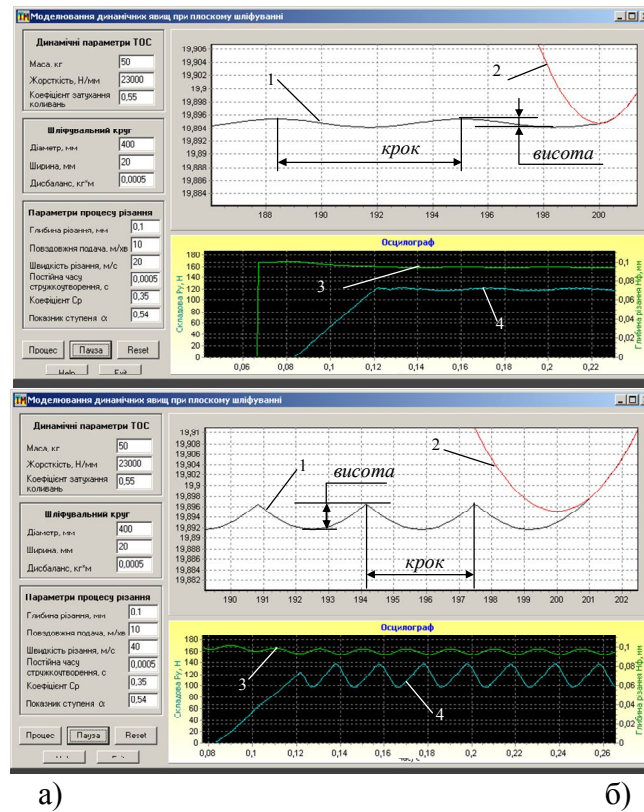


Рис.5. Інтерфейс прикладної програми під час моделювання

За результатами експериментів видно, що, після закінчення перехідного процесу, в ТОС виникають коливання, які відбиваються на оброблюваній поверхні і викликають певні відхилення від ідеальної геометричної форми. Відхилення форми від площинності можна характеризувати за висотою та кроком, причому, в залежності від співвідношення цих параметрів з'являється відхилення у формі хвилястості (лінія 1 на рис.5, а), яке, з підвищенням швидкості різання переходить в ограновування (лінія 1 на рис.5, б). Слід зауважити, що лінія 2, яка позначає інструментальну поверхню шліфувального круга у формі окружності, викривлена внаслідок нерівномірного збільшення масштабів за осями координат. Зведені результати експериментів представлені на рис.6.

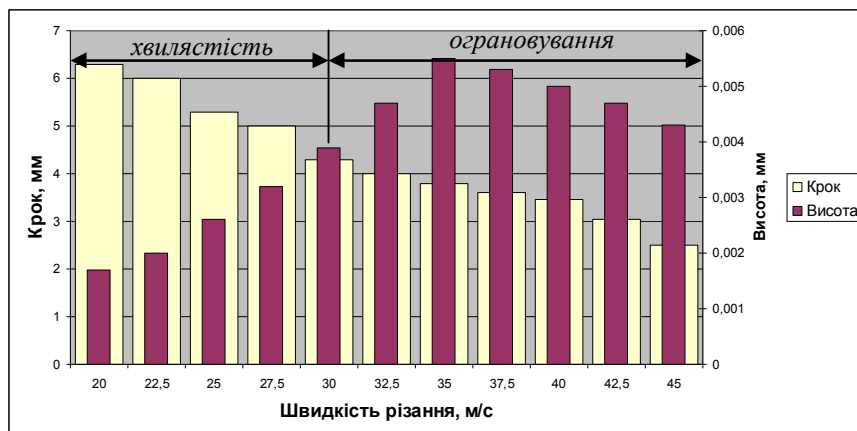


Рис.6. Залежність кроку та висоти відхилення форми від швидкості різання

Такий характер можна пояснити тим, що, після закінчення перехідного процесу, коливання ТОС відбуваються внаслідок дисбалансу шліфувального круга, а зі збільшенням швидкості різання має збільшуватись частота обертання круга, наближаючись до зони резонансу пружної ТОС, а отже, амплітуда коливань збільшується, провокуючи виникнення ограновування поверхні деталі. Зменшення кроку макронерівностей поверхні пояснюється саме переходом від хвилястості, коли вся траєкторія руху центру інструменту відбивається на поверхні деталі, до ограновування, коли частина сліду інструменту на поверхні деталі зникає внаслідок так званого «самопідрізання профілю».

На рис.7 представлений стан інтерфейсу при дослідженні залежності форми обробленої поверхні від повздовжньої подачі в обраному діапазоні: рис.7, а – подача 3 м/хв., рис.7, б – 12 м/хв. При постійній швидкості різання 30 м/с. У вікнах інтерфейсу застосовані такі ж позначення, що і на рис.5.

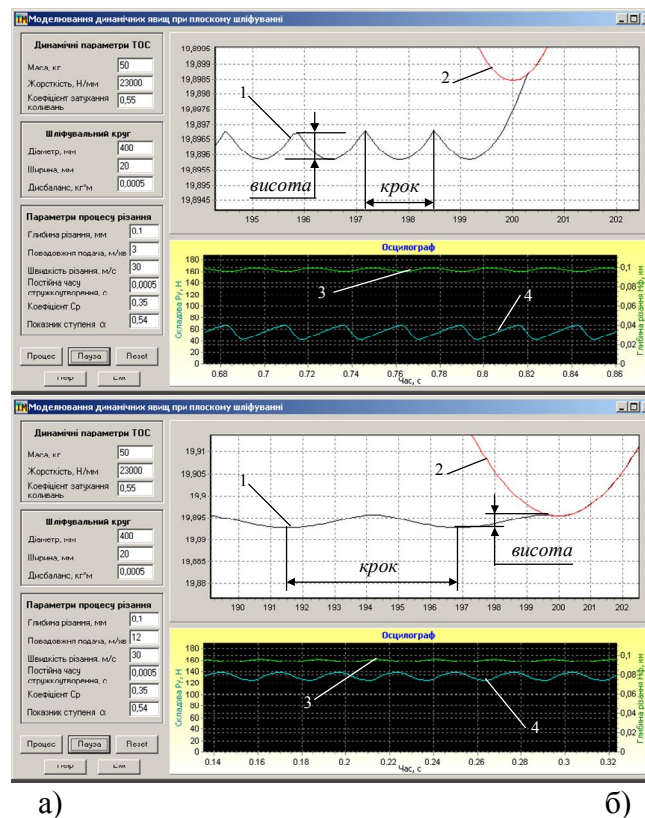


Рис.7. Інтерфейс прикладної програми під час моделювання

Аналіз результатів експериментів, що представлені на рис.8, показує незначну залежність висоти макронерівностей від повздовжньої подачі, проте крок макронерівностей змінюється майже пропорційно до величини повздовжньої подачі. Тат також, як і в попередній серії експериментів, спостерігається перехід від огранування до хвилястості обробленої поверхні.

Виконані експерименти показують, що межа переходу (хвилястість – ограновування) залежить від співвідношення між кроком та висотою макронерівностей при інших рівних умовах. Проведений аналіз дозволив встановити критерій визначення такого переходу, який можна побудувати на відношенні кроку до висоти. Якщо ця величина більше 1500 – утворюється хвилястість, менше 1500 – ограновування. Ясно, що для більш точного визначення межі необхідно зв'язати такий критерій з іншими параметрами ТОС, як геометричними, так і динамічними.

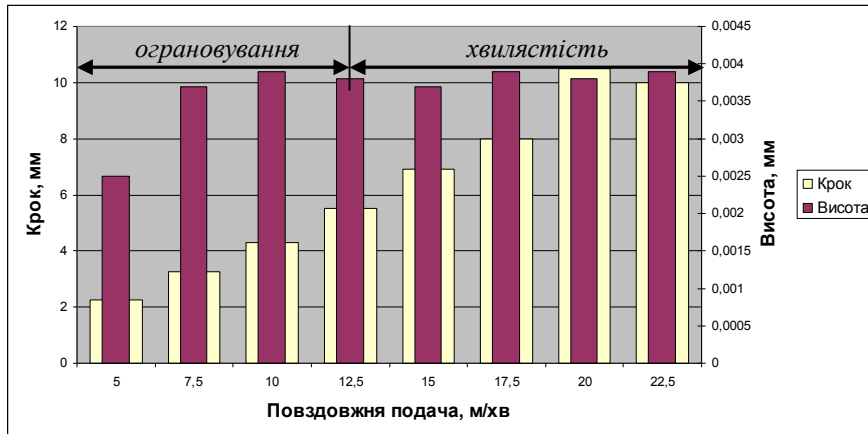


Рис.8. Залежність кроку та висоти відхилення форми від повздовжньої подачі

На рис.9 представлені 3D моделі поверхонь деталей, що побудовані за результатами проведених експериментів. Візуальна оцінка форми поверхонь показує, що у поверхні з ограновуванням (рис.9, а) слід очікувати більш низькі триботехнічні властивості, ніж у поверхні з хвилястістю. Крім того, виходячи з більшої висоти макронерівностей при ограновуванні у впадині, внаслідок більшої сили різання і дуги контакту, можуть з'являтися припали, що змінюють структуру матеріалу та знижують твердість.

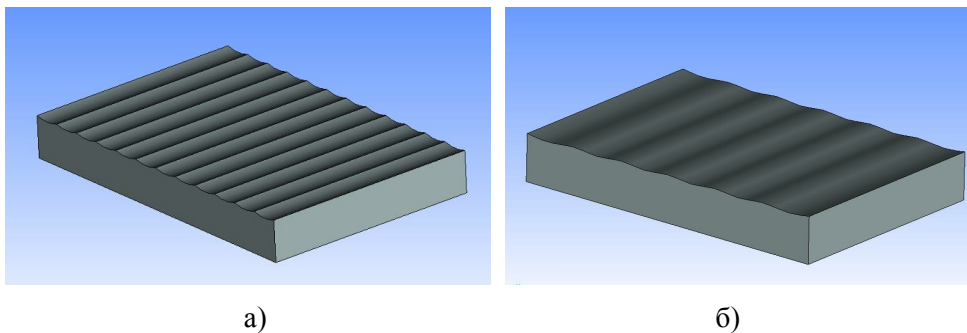


Рис.9. 3D моделі поверхонь деталей з ограновуванням (а) і хвилястістю (б)

Висновки

1. Розроблена математична модель плоского шліфування з урахуванням пружної технологічної обробляючої системи (ТОС), яка адекватно відображає процес в частині геометричного формоутворення і включає як динамічні параметри ТОС, так і геометричні параметри шліфувального круга та його дисбаланс.
2. Створена прикладна програма, яка дозволяє на етапі технологічної підготовки виробництва проводити моделювання і оцінювати залежності геометричної форми обробленої поверхні від головних параметрів ТОС.
3. Встановлений критерій, що може бути використаний для визначення межі між хвилястістю і ограновуванням обробленої поверхні деталі.

1. Резников А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. М., «Машиностроение», 1977, 391 с.
2. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням. Вид. УкрНДІАТ, Київ, 2004, 383с.
3. Петраков Ю.В. Развитие САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ. Вид.«Січкарь», Київ, 2011, 222с.