

ГАСАНОВ М. І., ОХРИМЕНКО О. А., КЛОЧКО О. О., ФЕДОРЕНКО В. С., ЛАНЬО К. Р., ГОРБУЛИК В. І.

ДИСИПАТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ЗУБООБРОБЦІ ВАЖКОНАТАЖЕНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

Дисипативне моделювання технологічних систем при зубообробці з метою передбачення параметрів якості сформованого поверхневого шару формується на основі математичної моделі, яка враховує як технологічні режими та геометричні характеристики процесу, так і фізико-механічні властивості матеріалу. Основою для моделювання слугує перехід пластичного витіснення матеріалу оброблюваної поверхні зубчастого колеса у взаємодії з інтегральним параметром, що описує стан поверхневого шару через показник шорсткості профілю. У роботі проаналізовано технологічні чинники, що впливають на досягнення необхідної якості обробленої поверхні, зокрема — залежність від кута ковзання під час процесу фрезерування зубчастих елементів. У межах дослідження було здійснено як теоретичний аналіз, так і експериментальну перевірку, спрямовані на встановлення оптимального значення кута ковзання, при якому забезпечується стабільний характер процесу різання, досягається необхідна зносостійкість інструменту та гарантується висока якість оброблюваної поверхні. При цьому важливим орієнтиром виступає максимальний контактний кут, що описує взаємодію зуба фрези з заготовкою. На основі співвідношення між цими кутами було сформовано коефіцієнт ефективності формування поверхневого шару, який дозволяє кількісно оцінити якість результату фрезерування залежно від геометрії та динаміки процесу.

Ключові слова: дисипативне моделювання, механічна обробка, технологічні системи, пластичне витіснення, кута ковзання, зубофрезерування, зубчасті колеса, поверхневий шар, якість.

M. HASANOV, O. OKHRIMENKO, O. KLOCHKO, V. FEDORENKO, K. LANO, V. GORBULYK DISSIPATIVE MODELING OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS IN GEAR MACHINING OF HEAVY-LOADED GEARS

Dissipative modeling of technological systems in gear machining, aimed at predicting the quality parameters of the formed surface layer, is based on a mathematical model that takes into account both the technological modes and geometric characteristics of the process, as well as the physico-mechanical properties of the material. The modeling approach is founded on the transition of plastic displacement of the material of the machined gear surface, in interaction with an integral parameter that describes the surface condition through a profile roughness index. The study analyzes technological factors influencing the achievement of the required surface quality, particularly the dependence on the sliding angle during the gear teeth milling process. The research includes both theoretical analysis and experimental validation, aimed at determining the optimal sliding angle that ensures a stable cutting process, provides the necessary tool wear resistance, and guarantees high surface quality. An important reference parameter is the maximum contact angle, which characterizes the interaction between the cutter tooth and the workpiece. Based on the ratio between these angles, an efficiency coefficient for surface layer formation was developed, enabling a quantitative assessment of machining quality depending on the geometry and dynamics of the process.

Key words: dissipative modeling, machining, technological systems, plastic displacement, sliding angle, gear hobbing, gears, surface layer, quality.

Вступ. У процесі високошвидкісного зубофрезерування контактні взаємодії між стружкою та ріжучим інструментом є надзвичайно складними та залежать від характеру навантаження на ріжучу частину інструменту, а також від локалізації зон пластичної деформації, що виникають у зоні вторинної деформації матеріалу. Для детального розуміння механізмів тертя, які реалізуються при обробці із застосуванням високошвидкісного зубофрезерування, необхідно застосовувати комплексний підхід. Це включає використання даних з матеріалознавства, фізики твердого тіла, прикладної механіки, методів фізико-хімічного аналізу, а також математичного і фізичного моделювання. У цьому контексті система “інструмент – заготовка” розглядається як багатофакторна динамічна система зі складною структурою взаємодій на мікро- та макрорівнях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існують різноманітні наукові концепції, що пояснюють природу контактної взаємодії між матеріалами інструменту та оброблюваної деталі в умовах високошвидкісної обробки [1–5].

Перші спроби встановити залежність між середнім коефіцієнтом тертя μ та швидкістю різання V були зроблені Розенбергом А.М. та Єр'омінін А.Н. У своїй роботі вони виявили, що значення μ досягає максимуму при температурному діапазоні 550–600 °С, що спостерігається при відповідній швидкості різання [3]. Згодом Зорев М.М. [2] критично переосмислив ці результати, встановивши, що реальне максимум значення μ досягається вже при температурі близько 300 °С. Це пояснюється недооцінкою впливу наросту стружки на зміну ефективного переднього кута різання та напрямку сходження стружки в попередньому дослідженні.

На підставі аналізу [2], можна зробити висновок, що середній коефіцієнт тертя μ значною мірою залежить від нормального контактного тиску q_n , який діє на робочій грані інструмента. У той самий час питома сила тертя q_x зберігає відносну інваріантність щодо режимів обробки, температури різання та інших умов, оскільки є властивістю самого оброблюваного матеріалу.

Ураховуючи наведене, варто зазначити, що швидкість різання V , глибина зрізу a та передній кут γ ріжучого елемента мають критичний вплив на величину коефіцієнта тертя. У контексті високошвидкісного фрезерування інваріантність питомої сили тертя q_x пов'язують із сукупним впливом температурного поля та швидкості процесу.

© М. І. Гасанов, О. А. Охріменко, Л. Я. Роп'як, О. О. Клочко, В. С. Федоренко, К. Р. Ланьо, В.І.Горбулік, 2025

Таким чином, параметри q_n та q_x розглядаються як окремі характеристики контактної взаємодії, кожна з яких залежить від різного набору факторів: q_x формується переважно силами пластичного зсуву в зоні контакту, тоді як q_n залежить від довжини реального контакту між поверхнями.

Для конкретного матеріалу деталі питома сила тертя залишається сталою, що дозволяє зробити висновок: зміни у значенні коефіцієнта тертя μ відбуваються головним чином через варіації в контактному тиску. Унаслідок цього всі зовнішні технологічні впливи (режими різання, геометрія інструменту тощо) будуть позначатися на μ лише в тій мірі, в якій вони змінюють середній контактний тиск q_n .

Варто також підкреслити, що для різних матеріалів заготовки будуть відповідати окремі криві залежності виду $\mu = f(q_n)$, оскільки q_x має індивідуальне значення, притаманне кожному матеріалу, що і формує характер тертя в конкретних умовах обробки.

Величина середнього коефіцієнта тертя в умовах високошвидкісного зубофрезерування не повинна тлумачитись як звичайний коефіцієнт тертя в класичному механічному розумінні [2]. Цей показник є усередненою характеристикою, що відображає як стан напружень у зоні контакту з пластичною деформацією, так і ефекти зовнішнього тертя. У практиці розрахунків при аналізі контактної взаємодії враховується вся контактна поверхня, хоча реальний розподіл напружень є складним. У зв'язку з цим середній коефіцієнт тертя доцільно розглядати як інтегральну характеристику загального напружено-деформованого стану у зоні стружкоутворення. За своїм фізичним змістом він може бути співвіднесений із так званим кутом дії, хоча однозначного функціонального зв'язку між ними не існує.

У низці досліджень [3, 4] доведено, що питома сила тертя qF не є функцією температури, а залежить виключно від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Наприклад, М.Ф. Полетіка [4] запропонував емпіричну залежність між qF і дійсним опором розриву матеріалу (S_k), яка має вигляд:

$$m = m_0(N + N_0), \quad (1)$$

Що стосується нормальних напружень q_n , то вони, на відміну від q_x , визначаються геометричними параметрами зони контакту і змінюються залежно від відносної довжини контакту, яка описується як C_a , де C – довжина контакту, а a – товщина зрізаного шару.

Додатково слід зазначити, що у дослідженнях М.Б. Гордона [5] було встановлено, що за умови відсутності наросту на передній поверхні інструменту при високошвидкісному різанні формується режим переважно зовнішнього кінетичного тертя, який у різному ступені модифікується адгезійною взаємодією. Розвиваючи ідеї Б.В. Дерягіна щодо багатфакторної природи тертя, Гордон сформулював математичну модель залежності коефіцієнта тертя μ , що враховує як пластичне зсувне тертя, так і адгезійні компоненти. Ці залежності є основою для подальших теоретичних і числових моделей, які описують тертя в системах "інструмент – оброблюваний матеріал" при різних умовах зубообробки.

$$m = m_0(N + N_0), \quad (2)$$

У поданому контексті параметр μ_0 трактується як базовий (істинний) коефіцієнт тертя, що враховує виключно вплив молекулярно-атомної мікрошорсткості контактуючих поверхонь та не залежить від явищ адгезії. Іншими словами, μ_0 характеризує тертя у випадку повної відсутності міжатомного зчеплення між матеріалами.

Параметр N_0 визначає результуючу силу молекулярного взаємного тяжіння між поверхнями, що взаємодіють, і розраховується за співвідношенням:

$$N_0 = \rho_0 \cdot S_0, \quad (2)$$

де:

- ρ_0 — інтенсивність молекулярної взаємодії на одиницю площі (сила міжатомного тяжіння),
- S_0 — площа фактичного контакту.

Г.І. Спіфанов [1], досліджуючи природу тертя у високошвидкісних умовах зубофрезерування, дійшов висновку, що роль нормального тиску полягає не в безпосередній участі у формуванні сили тертя, а у створенні умов для виникнення площі контакту внаслідок пластичної деформації при зовнішньому терті (Рис. 1).

На рис. 1 представлено умовну модель взаємодії металевої стружки з передньою поверхнею інструмента під час процесу високошвидкісного різання. У зоні, що прилягає до ріжучої кромки, спостерігається утворення так званих зон високого контактного тиску (ЗВКТ), або ж областей гальмування частинок, які виникають через інтенсивне нагромадження деформацій.

Мета дослідження. Дослідження дисипативного моделювання технологічних систем при зубообробці важконавантажених зубчастих коліс за допомогою нового підходу прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс, що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових похибки і методі статистичного математичного моделювання.

Основна частина. Розрізняються два основні типи контакту між стружкою та інструментом:

- контакт пружного типу (3) — з обмеженим проникненням і відновленням форми після взаємодії;

контакт пластичного типу (СПЛ) — при якому відбувається незворотна деформація матеріалу.\



Рис. 1 – Схема, що демонструє механізм тертя при високошвидкісному зубофрезеруванні

Як показано у дослідженнях [6], виникнення областей високого тиску (ОВТ) обумовлено формуванням особливої деформаційної структури у вигляді вихрового механізму в приконтактних шарах стружки. Ці зони є джерелом розвитку так званої динамічної дисипативної структури – наросту, що утворюється на передній грані інструмента. Наріст, у свою чергу, змінює ефективні геометричні параметри інструмента, що впливає на кут різання, тертя та зношування.

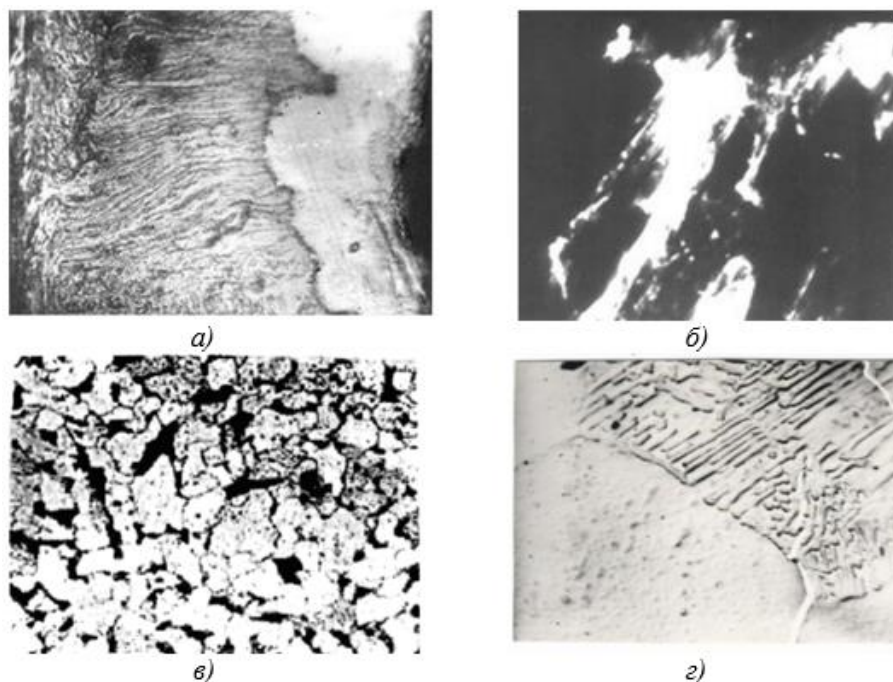


Рис.2 – Мікроструктурні зображення сталі 10 у зоні контакту інструмент–заготовка при високошвидкісному зубофрезеруванні.

На рис. 2 показано наступне:

- а – мікрофотознімок поверхні підшви наросту, збільшення $\times 200$, швидкість різання $V = 40$ м/хв;
- б – характер дислокаційної підструктури в області вторинної пластичної деформації, збільшення $\times 15000$, $V = 40$ м/хв;
- в – первинна (вихідна) мікроструктура до обробки, збільшення $\times 300$;
- г – деталізоване зображення вихідної структури, збільшення $\times 3000$.

На мікрофотознімку (рис. 2, а) зображено структуру металу в зоні контакту підшви наросту, утвореного під час високошвидкісного зубофрезерування. З аналізу зображення видно, що вздовж підшви наросту відбувається істотна трансформація структури деформованого металу. На початковій ділянці присутній

мартенситно-бейнітний стан, який в подальшому змінюється перлітною структурою із зернами, витягнутими у напрямку течії пластичної деформації. У завершальній частині підшви утворюється область феритної фази.

Як видно на рис. 2, б, у зоні вторинного деформування металу, яка прилягає безпосередньо до ріжучого лева, формується фрагментована дислокаційна структура. Фрагменти такої структури зазнають витягування і пластичного зсуву відповідно до напрямку течії матеріалу, однак чітка структура в них не виявляється. Зображення рис. 2, в і г демонструють початкову мікроструктуру сталі 10 при різних ступенях збільшення.

З цього випливає, що при терті в приінструментальній зоні спостерігається інтенсивне вторинне пластичне деформування цементитних включень, їх розщеплення, а також перенесення атомів вуглецю у напрямку до зони різання. Пластини цементиту при цьому повертаються, подрібнюються й орієнтуються відповідно до прикладених зсувних напружень. У результаті формується феритна структура з підвищеною пластичністю (рис. 2, а). Зафіксовані структури, подібні до гартованих, свідчать, що температура у мікрооб'ємах підшви наросту може досягати значень, що перевищують межі фазових перетворень сталей згідно з діаграмою Fe–C.

Щільність дислокацій поблизу феритних зерен в зоні пластичного зсуву досягає критичних значень ($\rho \approx 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$). Формується коміркова структура, яка витягується у бік ріжучої кромки під впливом локалізованих високих контактних тисків.

Таким чином, зафіксовані локальні структури, характерні для термозміцнення (рис. 3.5, а), слід інтерпретувати як фазові перетворення з утворенням нерівноважних дисипативних структур у зоні різального контакту. Вони виконують роль ефективних каналів дисипації енергії деформаційного процесу.

Аналіз зображень, зокрема рис. 2, а, підтверджує, що зміна коефіцієнта тертя μ із температурою обумовлена структурними й фазовими модифікаціями в приінструментальних шарах. Це призводить до варіації механічних властивостей по довжині зони пластичного контакту: утворення зон з підвищеною пластичністю (феритна фаза) спричиняє зростання площі пластичного контакту (СПЛ) і загальної довжини контакту C , що, своєю чергою, зменшує qN – питомий тиск, але сприяє зростанню середнього коефіцієнта тертя μ .

На рис. 3 представлено результати експериментальних досліджень залежності коефіцієнта тертя та висоти наросту від температури, яка штучно підтримувалась на ріжучій частині без урахування ефекту швидкості деформації. З графіка видно, що як висота наросту H , так і значення коефіцієнта тертя μ досягають максимуму приблизно при температурі 300 °C. Це корелює з відомими даними [8], згідно з якими при температурі близько 300 °C значно підвищується дифузійна рухливість атомів вуглецю в сталях, особливо по міжзернових межах. Як буде продемонстровано в наступних підрозділах на основі квантово-механічного аналізу, поблизу цієї температури також активізуються дифузійні процеси в кобальтовій матриці твердосплавних інструментів.

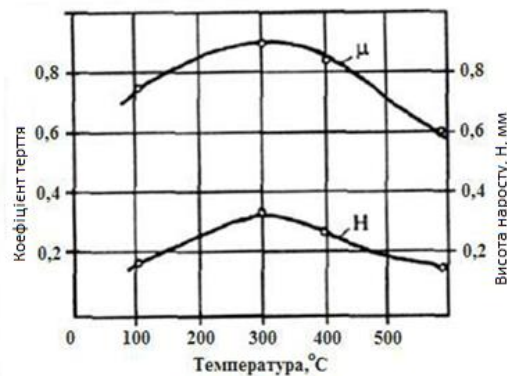


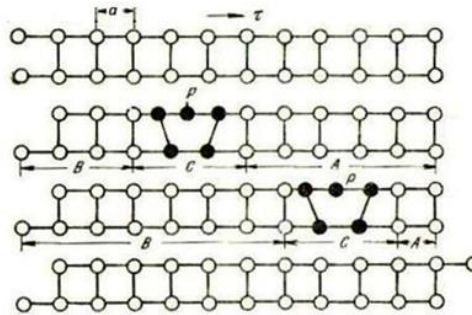
Рис. 3 – Графічна залежність коефіцієнта тертя (μ) та висоти наросту (H) від температури локального нагріву ріжучої частини: інструмент – твердосплавний різець типу ВК8; матеріал – сталь У8; швидкість різання $V = 0,1$ м/хв; глибина різання $a = 0,2$ мм; ширина зони різання $b = 2$ мм

Аналіз результатів мікроструктурних досліджень (рис. 2, а) свідчить про те, що по довжині зони пластичної взаємодії між стружкою та передньою поверхнею інструменту при досягненні швидкості різання, еквівалентної критичній швидкості наростоутворення $V=V_H$ можна виділити дві відмінні області: ділянку інтенсивного зміцнення матеріалу (швидкісна зона гарту) та зону подальшого ослаблення структури (зону розм'якшення).

У випадку невисоких швидкостей різання ($V=V_H$) було зафіксовано, що контактна область пластичної взаємодії між інструментом та стружкою здатна поділятися навіть на три окремі підзони. При цьому зона, яка демонструє максимальні значення мікротвердості, зазвичай локалізована на початку ділянки пластичного контакту. Зона, де відбувається помітне зниження твердості матеріалу, формується наприкінці підшви наросту – саме в тій частині контакту, де температурний вплив досягає свого максимуму по довжині взаємодії між стружкою та ріжучою частиною інструменту [4].

Слід підкреслити, що процес пластичної деформації у зоні тертя має істотно інший характер порівняно з пружною. Вона настільки глибока, що веде до розриву міжатомних зв'язків між сусідніми атомами, які ще до

моменту деформації утворювали стійкі зв'язки. Інакше кажучи, пластична деформація ініціюється тоді, коли локальні напруження у металі досягають критичного рівня, порівняного з теоретичною границею міцності, що становить приблизно 10% від об'ємного модуля стиску ($0,1 \cdot B$). Проте в реальних матеріалах цей поріг значно нижчий через наявність дислокаційних дефектів, які суттєво полегшують початок деформаційного процесу.



*B – початковий стан; б і в – різні стадії зсуву; г – стан після зсуву;
 - ділянку, непретерпевший ковзання; B – ділянку, на якому зрушення
 вже пройшов; - ділянку максимальних спотворень, створюваних і
 переміщуваний при послідовному розвитку зсуву*

Рис. 4 – Пластичного зсув при дотичному навантаженні

На рисунку 4 представлена узагальнена схема порушення міжатомних зв'язків у кристалічній структурі під дією зовнішнього дотичного навантаження. У випадку прикладення зсувного зусилля, міжатомна відстань, що дорівнює величині a , викликає переміщення атомних шарів у напрямку дії сили, внаслідок чого починається процес локалізованого ковзання з участю дислокацій. Наявність дислокацій у кристалічній решітці обумовлює появу локальних областей, у яких енерговитрати на розрив зв'язків компенсуються шляхом їх часткового відновлення в іншій частині структури.

Коли в матеріалі реалізується ковзання, дислокація також переміщується вздовж відповідної площини зсуву. У спрощеній схемі (рис. 4) дислокаційна лінія розташована перпендикулярно до площини зображення, а її умовне відображення на схемі – точка p . У зоні, де відбувається пластичне зміщення атомів, відстань між шарами зберігається сталою, однак при переході через лінію дислокації воно зменшується до нуля. Таким чином, поблизу лінії дислокації виникає порушення регулярної атомної структури, що відповідає наявності додаткової атомної площини.

З розвитком зсуву у верхній частині кристалічної структури утворюється надлишкова площина атомів, яка формує дислокаційний об'єм. Саме переміщення цієї додаткової напівплощини вздовж площини ковзання й зумовлює виникнення та рух дислокаційної лінії.



Рис. 5 – Графік зміни питомої сили тертя залежно від параметра E_d в умовах високошвидкісної обробки (режим: $V = 100$ м/хв; $S = 0,161$ мм/об)

На рис. 5 продемонстровано, як питомий опір тертю змінюється залежно від дефектної енергії упаковки (E_d) в кристалічних структурах різних металів і сплавів. Енергетичний дефект, що виникає через порушення закономірного чергування щільно розміщених атомів у кристалічній решітці, супроводжується зростанням запасеної енергії. Чим більшим є значення E_d , тим вищою виявляється поверхнева енергія матеріалу, що в свою чергу свідчить про підвищену здатність утворювати міцні міжатомні зв'язки. Як впливає з аналізу графіка, підвищення E_d прямо корелює з ростом питомої сили тертя.

На рис. 6 відображено взаємозв'язок між питомою силою тертя і питомою теплотою плавлення матеріалу. Питомою теплотою плавлення визначає кількість енергії, необхідної для переходу речовини з твердого стану до рідкого. Аналіз показує: зменшення теплового бар'єра (H) сприяє зростанню питомого опору тертю, що вказує на квазірідку або аморфну природу локальних шарів під час інтенсивного тертя.

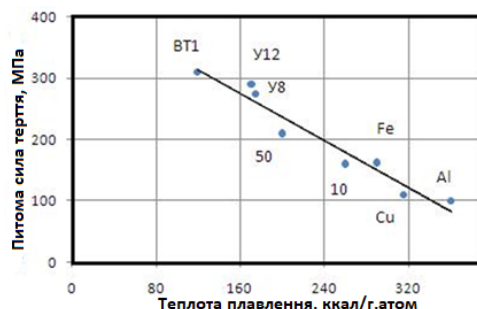


Рис. 6 – Залежність питомої сили тертя від питомої теплоти плавлення в умовах $V = 100$ м/хв, $S = 0,157$ мм/об

Системний аналіз графіків (рис. 5–6) дозволяє стверджувати, що при значному локальному навантаженні в прифрезерній зоні стружки досягається критичний енергетичний рівень, що сприяє аморфізації матеріалу. Під впливом високої швидкості деформацій та температурних градієнтів щільність дислокацій досягає граничних значень, викликаючи фазові перетворення та утворення тимчасових нестабільних структур із подальшою рекристалізацією.

Також спостерігається подібна закономірність і в поведінці коефіцієнта тертя μ : зі зменшенням теплоти плавлення зростає значення μ . Це ще раз підкреслює зв'язок між енергетичними характеристиками матеріалу і його трибологічною поведінкою.

Важливу роль у процесі контактної взаємодії відіграє не лише оброблюваний матеріал, а й характеристики інструменту, зокрема структура та тип твердого сплаву. У зв'язку з цим було проаналізовано щільність електронних станів на поверхні твердосплавного інструментального матеріалу — зокрема, карбіду вольфраму, легovanого залізом. У формуванні електронного потенціалу важливу роль відіграють як d-електрони, так і s- та r-електронні стани.

На рис. 7 представлено модельний атомний кластер, що використовувався для обчислення загальної енергії системи та міжатомних взаємодій між шарами Fe та WC методом молекулярної динаміки. Розрахунки проведено із застосуванням методу Basin-Hopping для пошуку глобального мінімуму енергії. Результати показали, що при температурах понад 600 K система втрачає стабільність: міжатомні відстані зменшуються, а повна енергія системи стрімко зростає. Таке зростання пов'язано з імовірним переходом від α -фази до β -фази кобальту, який є основою зв'язувальної фази в більшості твердосплавних інструментів.

У подальшому були виконані квантово-механічні розрахунки з метою визначення повної енергії систем, що включають різні комбінації контактуючих елементів.

Параметри обраного кластерного об'єму забезпечували як необхідний рівень точності при моделюванні енергетичного стану, так і допустимий обчислювальний час. У якості основного критерію для оцінки було використано значення повної енергії зв'язку E_{tot} у межах кластера (табл. 1).

Таблиця .1 – Повна енергія міжатомної взаємодії в різних системах

системи	E_{tot} (Au)
Co/Al	- 19,017
Co/Fe	- 31,950
Co/Ti	- 38,990
WC/Al	-
WC/Fe	- 16,070
WC/Ti	- 18,760
TiC/Fe	- 18,230
TiC/Ti	- 33,990

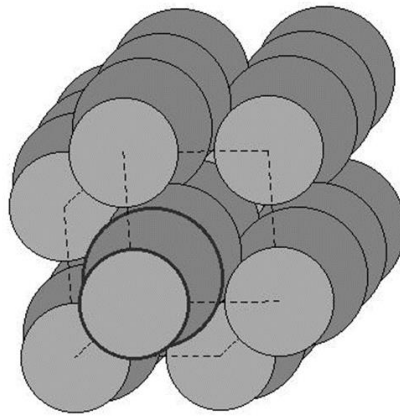


Рис. 7 – Схема модельного кластера для квантово-механічного розрахунку енергії взаємодії у системі WC–Fe

Повна енергія зв'язку кластера (E_{tot}), узятя із протилежним знаком, характеризує енергетичні витрати, необхідні для повного розриву всіх зв'язків між атомами, тобто для повного розпаду кластеру на окремі атоми. Значення питомої енергії зв'язку на один атом визначається як $E_a = E_{tot} / N$, де N – кількість атомів у кластері. Водночас міжатомні відстані прагнуть до значень, притаманних експериментально виявленим параметрам кристалічної решітки. За результатами розрахунків встановлено, що в дослідженні використовувалися кластери, які містили 30 атомів.

Аналізуючи отримані результати (табл. 1), можна стверджувати, що найвищі енергетичні показники демонструють системи Co–Ti, TiC–Ti і Co–Fe. У випадку з WC–Al спостерігалася нестабільність обчислюваних параметрів, що призвело до неможливості отримання узгоджених результатів.

Крім того, на основі вивчення електронної щільності кобальту і карбиду вольфраму встановлено, що рівень Фермі в Co є вищим, ніж у WC. Це пояснює чутливу взаємодію нанопокриттів саме з кобальтовою матрицею, а не з карбідом вольфраму. Отже, зчеплення захисного покриття з основою із твердого сплаву визначається переважно інтенсивністю хімічного зв'язку між атомами покриття й кобальту, що, у свою чергу, залежить від електронної конфігурації елементів. Зокрема, для перехідних металів критичну роль відіграють d- та s-електрони. Висока міцність зв'язків досягається через перекриття відповідних орбіталей, що створює сили тяжіння між ядрами. Саме тому титан виявляється найактивнішим серед цих елементів.

Подальший етап включав обчислення параметрів кристалічної структури, просторової конфігурації, модулів пружності та повної енергії, що припадає на один атом, для зазначених сполук. Результати були співставлені з експериментальними даними. Крім того, оцінювалася ефективність використання графічних процесорів за технологією NVidia CUDA для обчислень — було виявлено підвищення продуктивності розрахунків у 1,5–2 рази.

У процесі врізання зуба фрези в матеріал обробки відбувається ковзання по поверхні з відповідним кутом $\Psi_{ск}$ (рис. 8).

– Якщо α_i значно менше за $K_{сожр}$ (рис. 8), то спостерігається лише пластична деформація без утворення стружки.

– У випадку, коли α_i дорівнює $K_{сожр}$ (рис. 9), відбувається ініціація процесу стружкоутворення та початок формування поверхневого шару.

– При $\alpha_i > K_{сожр}$ (рис. 10) фіксується стабільний процес утворення стружки протягом повного циклу контакту зуба з поверхнею до його виходу з зони взаємодії на куті Ψ_{max} .

Співвідношення між поточним кутом ковзання $\Psi_{ск}$ і максимальним кутом Ψ_{max} відіграє вирішальну роль у забезпеченні ефективності формування поверхневого шару.

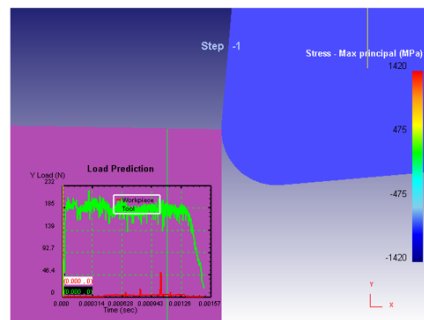


Рис. 8 – Формування поверхневого шару зубооброблюючою фрезою при $\alpha_i \ll K_{сожр}$

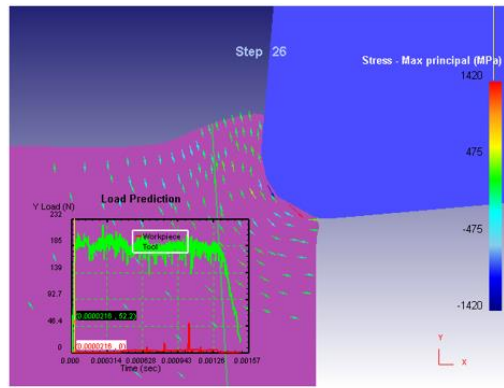


Рис. 9– Формування поверхневого шару зубооброблюючою фрезою при $a_i < K_{сожр}$

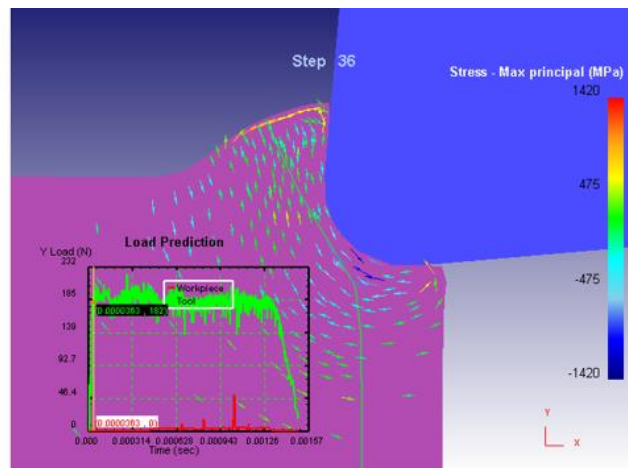


Рис. 10 – Формування поверхневого шару зубооброблюючою фрезою при $a_i = K_{сожр}$

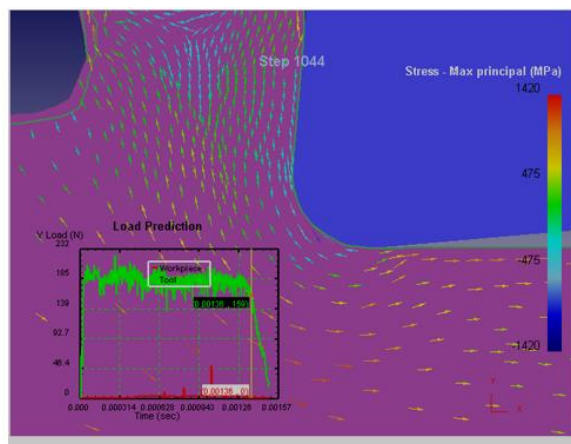


Рис. 11 – Формування поверхневого шару зубооброблюючою фрези при $a_i > K_{сожр}$

З метою передбачення параметрів якості сформованого поверхневого шару була побудована математична модель, яка враховує як технологічні режими та геометричні характеристики процесу, так і фізико-механічні властивості матеріалу. Основою для моделювання слугує перехід пластичного витіснення матеріалу оброблюваної поверхні зубчастого колеса у взаємодії з інтегральним параметром, що описує стан поверхневого шару. Останній виражається через показник шорсткості профілю — параметр Rz.

У роботі проаналізовано технологічні чинники, що впливають на досягнення необхідної якості обробленої поверхні, зокрема — залежність від кута ковзання під час процесу фрезерування зубчастих елементів. У межах дослідження було здійснено як теоретичний аналіз, так і експериментальну перевірку, спрямовані на

встановлення оптимального значення кута ковзання $\Psi_{ск}$, при якому забезпечується стабільний характер процесу різання, досягається необхідна зносостійкість інструменту та гарантується висока якість обробленої поверхні.

При цьому важливим орієнтиром виступає максимальний контактний кут $\Psi_{тах}$, що описує взаємодію зуба фрези з заготовкою. На основі співвідношення між цими кутами було сформовано коефіцієнт ефективності формування поверхневого шару, який дозволяє кількісно оцінити якість результату фрезерування залежно від геометрії та динаміки процесу.

Висновки.

Новий підхід прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс, що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових похибки і методі статистичного математичного моделювання ґрунтується на методі дисипативного моделювання технологічних систем.

Відмінністю реального формоутворення від номінального (ідеального) є наявність відхилень параметрів стану поверхневого шару крупногабаритних зубчастих коліс реальних профілів від номінальних. Основними кінцевими задачами, які повинні бути вирішені при дослідженні закономірностей реального формоутворення, є задачі імітаційного моделювання прогнозування з заданою вірогідністю похибок, які виникають, а також задачі управління, в тому числі оптимального, цими похибками.

Результати експериментального визначення навантаження заїдання, для умов експлуатації важконавантажених гірських машин, дозволили уточнити значення коефіцієнта: для нелегованих масел – $c_p = 1,7$; для масел, легованих протизадирними присадками – $c_p = 2,2$.

Список літератури

1. Гасанов М.І., Пермяков О.А., Шелковий О.М., Заковортний О.Ю., Клочко О.О. Проблеми відновлення функціональних властивостей експлуатації крупногабаритних зубчастих передач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – № 1 (7) 2023. – С. 6–15. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2023.1(7).01
2. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemir I. Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): Modern trends in metalworking, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – P. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
3. Технологические основы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес: монография / А. А. Клочко [и др.]. – Краматорск : ДГМА, 2014. – 479 с. ISBN 978-966-379-667-3.
4. Исследование процессов зубофрезерования закаленных шевронных зубчатых колес / А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Е.В. Басова, С.Ю. Палашек, А.Л. Невмержицкий // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – Вип. 40. – С. 90–101.
5. Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
6. Полонський, Л. Г., Клочко, О. О., Охріменко, О. А., Бецко, Ю. М., Коваль, Б. Г., & Храбан, Д. В. (2024). Особливості визначення профілю інструменту для гвинтових поверхонь за допомогою САД-систем. *Технічна інженерія*, (1(93)), 70–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-70-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-70-80)
7. Гасанов М.І., Заковортний О.Ю., Клочко О.О., Рябченко С.В. Перспектива дослідження процесу швидкісного абразивного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 26–27 березня 2024 р. – Київ: АТМ України, 2024. – С. 24–25.
8. Гасанов М.І., Клочко А.А., Черкашина Г.І., Перминов Е.І. Групповые маршрутные технологические процессы восстановления крупногабаритных зубчатых колес на основе имитационного моделирования с учетом прогрессирующих видов износа // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – Вип. 42. – С. 28–36.
9. Гасанов М.І., Клочко О.О., Заковортний О.Ю., Перминов Є.В. Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282) 2018. – С. 107–112. – ISSN 2079-004X.
10. Шелковой А.Н. Обеспечение эксплуатационных свойств закаленных зубчатых колес / А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, М.И. Гасанов // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. – Севастополь : ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2017. – Вип. 8. – С. 61–70.
11. Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / О.М. Шелковий, О.О. Клочко, М.І. Гасанов, Д.О. Кравченко, О.О. Анциферова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 66–74. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.
12. Клочко А.А., Гасанов М.І., Басова Е.В. Регламент выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 145–157. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

13. Клочко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Майборода В.С., Охрименко О.О., Федоренко В.С. Технологічні передумови деформації і рушення зрізуемого шару при швидкісному зубофрезуванні загартованих циліндричних зубчатих коліс на основі атомного підходу // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 1 (5) 2022. – С. 10–20. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).02
14. Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., & Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 92-104.
15. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. *Tehnicki Vjesnik*, 25(2), 643-648.

References (transliterated):

- Hasanov M.I., Permyakov O.A., Shelkovyi O.M., Zakovorotnyi O.Yu., Klochko O.O. Problemy vidnovlennia funktsionalnykh vlastyvostei ekspluatatsii krupnolahabarnykh zubchastykh peredach [Problems of restoring functional properties in the operation of large-sized gear drives]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Serii: Tekhnologii v mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a Machine Industry*, no. 1(7), 2023, pp. 6–15. ISSN 2079-004X. [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.1\(7\).01](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.1(7).01)
- Kovalev V.D., Vasilchenko Y.V., Klochko A.A., Gasanov M.I. Technology of restoration of large gear boxes. In: Dašić, P. (ed.) *Modern Trends in Metalworking*, vol. 1. Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018, pp. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
- Klochko A.A., et al. Tekhnolohichni osnovy zuboobrabotky zakalennykh krupnomodulnykh zubchastykh koles [Technological principles of gear machining of hardened large-module gears]. Kramatorsk: DGMA, 2014. 479 p. ISBN 978-966-379-667-3.
- Klochko A.A., Hasanov M.I., Basova E.V., Palashek S.Yu., Nevmerzhytskyi A.L. Issledovanie protsessov zubofrezerovaniia zakalennykh shevronnykh zubchastykh koles [Study of gear hobbing processes of hardened helical bevel gears]. *Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system = Tool Reliability and Optimization of Technological Systems*, no. 40, 2017, pp. 90–101.
- Klochko O., Okhrimenko O., & Shapovalov M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380.
- Polonskyi L.H., Klochko O.O., Okhrimenko O.A., Betsko Yu.M., Koval B.H., & Khraban D.V. (2024). Osoblyvosti vyznachennia profilu instrumentu dlia hvyntovykh poverkhon za dopomohoiu CAD-system [Features of defining tool profile for helical surfaces using CAD systems]. *Tekhnichna Inzheneriia = Technical Engineering*, 1(93), 70–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-70-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-70-80)
- Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Yu., Klochko O.O., Riabchenko S.V. (2024). Perspektyva doslidzhennia protsesu shvydkisnogo abrazivnogo zubofrezeruvannia tsylindrychnykh zubchastykh koles [Prospects of studying the process of high-speed abrasive gear hobbing of cylindrical gears]. In: *Suchasni pytannia vyrobnytstva ta remontu v promyslovosti i na transporti = Modern Issues of Production and Repair in Industry and Transport: Proc. of Int. Sci.-Tech. Seminar*, March 26–27, 2024. Kyiv: ATM Ukrainy, pp. 24–25.
- Hasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashyna H.I., Perminov Ye.I. (2018). Hruppove marshrutnye tekhnolohicheskie protsessy vosstanovlennia krupnolahabarnykh zubchastykh koles na osnove imitatsyonnoho modelirovaniia s uchetom prohressiruiushchykh vydov iznosa [Group routing technological processes of restoring large-size gear wheels based on simulation modeling considering progressive wear types]. *Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system = Tool Reliability and Optimization of Technological Systems*, no. 42, pp. 28–36.
- Hasanov M.I., Klochko O.O., Zakovorotnyi O.Yu., Perminov Ye.V. (2018). Tekhnolohichni rehlement optymizatsii system vidnovlennia funktsionalnykh vlastyvostei velkolahabarynykh vidkrytykh zubchastykh peredach [Technological regulations for optimizing systems of restoring functional properties of large open gear drives]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "KhPI". Serii: Tekhnologii v Mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a Machine Industry*, no. 6(1282), pp. 107–112. ISSN 2079-004X.
- Shelkovoii A.N., Klochko A.A., Hasanov M.I. (2017). Obespechenie ekspluatatsionnykh svoistv zakalennykh zubchastykh koles [Ensuring operational properties of hardened gears]. *Vestnik sovremennykh tekhnologii = Bulletin of Modern Technologies*, no. 8, pp. 61–70. Sevastopol: FGBOU VO "Sevastopol State University".
- Shelkovyi O.M., Klochko O.O., Hasanov M.I., Kravchenko D.O., Antsyferova O.O. (2017). Funktsionalni aspekty imitatsiinoho matematychnoho modeliuvaniia heometrychnykh parametriv protsesu zubofrezeruvannia [Functional aspects of simulation-based mathematical modeling of gear hobbing process geometry]. *Visnyk NTU "KhPI". Serii: Tekhnologii u Mashynobuduvanni = Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in Mechanical Engineering*, no. 26(1248), pp. 66–74. ISSN 2079-004X.
- Klochko A.A., Hasanov M.I., Basova E.V. (2016). Rehlement vybora i naznacheniia parametrov sostoianii poverkhnostnoho sloia zakalennykh zubchastykh koles [Regulations for selection and assignment of surface layer condition parameters in hardened gears]. *Visnyk NTU "KhPI". Serii: Tekhnologii u Mashynobuduvanni = Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in Mechanical Engineering*, no. 33(1205), pp. 145–157. ISSN 2079-004X.
- Klochko O.O., Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Yu., Maiboroda V.S., Okhrimenko O.O., Fedorenko V.S.

(2022). Tekhnolohichni peredumovy deformatsii i rushennia zrizuieomoho sharu pry shvydkisnomu zubofrezuVanni zahartovanykh tsylindrychnykh zubchatykh koles na osnovi atomnoho pidkhopu [Technological prerequisites for deformation and displacement of the cut layer during high-speed gear hobbing of hardened cylindrical gears based on the atomic approach]. Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "KhPI". Seriya: Tekhnolohii v Mashynobuduvanni = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a Machine Industry, no. 1(5), pp. 10–20. ISSN 2079-004X. [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.1\(5\).02](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.1(5).02)

14. Ramadani R., Belsak A., Kegl M., Predan J., Pehan S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. International Journal of Simulation Modelling, 17(1), 92–104.

15. Gołębski R., Ivandic Z. (2018). Analysis of modification of spur gear profile. Tehnicki Vjesnik = Technical Gazette, 25(2), 643–648.

Надійшла (received) 17.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Гасанов Магомедємін Ісагомедович (Hasanov Magomedemin) – доктор технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: kh.hpi.hasanov@gmail.com, ORCID:0000-0002-2161-2386

Охріменко Олександр Анатолійович (Ohrimenko Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; пр. Перемоги, 37, Україна; e-mail: alexhobs77@gmail.com. ORCID: 0000-0002-5446-6987

Клочко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr) – доктор технічних наук, професор завідувач кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.:+38067-936-36-64, e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455.

Федоренко Віталій Сергійович (Fedorenko Vitalii) – кандіат технічних наук, асистент кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; тел.: (095) 9159688–e-mail: 19fws98@gmail.com, ORCID: 0009-0006-3781-6144

Ланьо Крістіна Рудольфівна (Lano Kristina) – магістр науковець, кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; тел.: (099) 268 80 24 –e-mail: kristinaxx08.08@gmail.com, ORCID 0009-0005-6271-1099

Горбулик Володимир Іванович (Gorbulyk Volodymyr) – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, Україна м.Чернівці, вул. Коцюбинського,2., тел. +38050 9792460, E_mail gorbulic@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6091-2261>