

**ГАСАНОВ М.І., ПЕРМЯКОВ О.А., ЗАКОВОРОТНИЙ О.Ю., КЛОЧКО О.О., ОХРИМЕНКО О.А., МАЙБОРОДА В.С., ГЛУШКО В.С.**

### **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ІМПУЛЬСНОГО ШВИДКІСНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ АТОМНОГО ПІДХОДУ**

Розглянуто механізм утворення з'єднаної (сегментованої) стружки за високих швидкостей зубофрезерування. Показано, що це явище пов'язане зі збільшенням межі текучості металу та зменшенням його пластичності зі збільшенням швидкості різання, а отже, і швидкості деформації. Збільшення швидкості деформації зі збільшенням швидкості різання створює менш енергоємний крихкий механізм руйнування стружкових елементів. Це, своєю чергою, призводить до зменшення ступеня деформації розрізаного шару, зусиль різання та усадки стружки. Вплив типу кристалічної решітки оброблюваного матеріалу на зовнішній вигляд стружки проявляється через енергію розриву штабелювання, яка впливає на формування дислокаційної структури в зоні стружкоутворення, що визначає вихідні параметри процесу різання: опір пластичній деформації, сили різання, ступінь деформації та усадки різаного шару. Застосування атомного підходу відкриває широкі можливості вдосконалення швидкісного імпульсного зубофрезерування, зокрема, поліпшення енергоефективності фрезерування. Визначено залежності між фізичними параметрами при швидкісному зубофрезеруванні: потужності, швидкості різання, енергією розриву міжатомних зв'язків у кластерах металу. Знайдено два напрями підвищення енергоефективності імпульсного швидкісного зубофрезерування: можливе зменшення потужності електродвигуна, що приводить, і використання енергії розриву міжатомних зв'язків у подальшому фрезеруванні.

**Ключові слова:** функціональні властивості, швидкісне зубофрезерування, опір пластичній деформації, сили різання, ступінь деформації, енергією розриву міжатомних зв'язків

**HASANOV M.I., PERMYAKOV O.A., ZAKOVOROTNYI O.YU., KLOCHKO O.O., OKHRYMENKO O.A., MAYBORODA V.S., GLUSHKO V.S.**

### **ENERGY EFFICIENCY OF PULSE HIGH-SPEED TOOTH MILLING TAKING INTO ACCOUNT THE ATOMIC APPROACH**

The mechanism of formation of connected (segmented) chips at high speeds of tooth milling is considered. It is shown that this phenomenon is associated with an increase in the yield point of the metal and a decrease in its plasticity with an increase in the cutting speed and, therefore, the deformation speed. An increase in the rate of deformation with an increase in the cutting speed creates a less energy-intensive fragile mechanism for the destruction of chip elements. This, in turn, leads to a decrease in the degree of deformation of the cut layer, cutting forces and chip shrinkage. The effect of the type of crystal lattice of the processed material on the appearance of the chip is manifested through the stacking fracture energy, which affects the formation of the dislocation structure in the chip formation zone, which determines the initial parameters of the cutting process: resistance to plastic deformation, cutting forces, the degree of deformation and shrinkage of the cut layer. The application of the atomic approach opens up wide possibilities for improving high-speed pulsed tooth milling, in particular, improving the energy efficiency of milling. The dependences between physical parameters during high-speed tooth milling were determined: power, cutting speed, energy of breaking interatomic bonds in metal clusters. Two ways of increasing the energy efficiency of pulsed high-speed tooth milling were found: a possible reduction in the power of the driving electric motor and the use of the energy of breaking interatomic bonds in subsequent milling.

**Key words:** functional properties, high-speed tooth milling, resistance to plastic deformation, cutting forces, degree of deformation, breaking energy of interatomic bonds

**Вступ.** Методика визначення енергоефективності при імпульсному швидкісному зубофрезеруванні представлена саме на підставі атомного підходу. Розуміння фізичних процесів, що відбуваються під час різання, контактної взаємодії стружки з інструментом, дає нові напрями щодо підвищення енергоефективності обробки металу.

Прагнення скорочення споживання електроенергії при виконанні технологічних процесів, зокрема фрезеруванні металів, призводить до модернізації механізмів, що використовують енергію, що вивільняється в самому процесі різання.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Процес деформації та руйнування стружки при швидкісному зубофрезеруванні з урахуванням атомного підходу розглядається в деяких останніх публікаціях.[1] Однак оцінка енергоефективності імпульсного швидкісного зубофрезерування, використання при фрезеруванні енергії, що виділяється в результаті руйнування міжатомних зв'язків, потребує подальшого детального та глибокого вивчення

При швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом процес пластичної деформації реалізується за схемою стиснення та простого зсуву [1, 2, 3, 4] Доказано, що опір пластичної деформації шару, що зрізається, залежить від типу кристалічної решітки оброблюваного матеріалу, його енергії дефекту упаковки та наявності домішок на межах зерен. Вплив цих факторів проявляється через види диссипативних структур, що формуються в процесі деформації шару, що зрізається і визначають її локалізацію. У вуглецевих сталях основною домішкою є вуглець, який, розташовуючись на межах зерен, може сприяти їхньому хрущенню. Зі зростанням температури дифузійна рухливість вуглецю зростає, що полегшує прослизання зерен, збільшує та змінює форму стружки.

**Основна частина.** Розглянемо процес стружкоутворення при врзанні різального інструменту в заготовлю, роблячи акцент на силі, яку потрібно прикласти для розриву міжатомних зв'язків оброблюваного матеріалу та фізичних процесів, які при цьому відбуваються.

Схема врзання зуба фрези схематично показана на мал. 1

У процесі зняття стружки деформація шарів оброблюваного матеріалу виникає не тільки в області площини сколювання стружки, а й попереду зуба фрези і під площиною різання. Однак зараз нас цікавить площина пластичного зсуву.

© М.І. Гасанов, О.А. Пермяков, О.Ю. Заковоротний, О.О. Клочко, О.А. Охрименко, В.С. Майборода, В.С. Глушко 2024

Пластична деформація може виникнути, якщо через кристал пройдуть не тільки дислокації (вихідна структура вже має певну кількість дислокацій), але й знову утворені. Напруги, необхідні для початку пластичної деформації (без дислокацій), тобто для розриву міжатомних зв'язків, становлять близько 10 % від модуля зсуву. Наприклад, для заліза міжатомна відстань становить 2,48 Å, енергія дислокації на цю відстань — ~6 еВ, а міцність міжатомного зв'язку Fe-Fe — 4,290 еВ. Енергія дислокації перевищує міцність міжатомних зв'язків Fe-Fe, тому рух дислокацій супроводжуватиметься деформацією кристала, тобто розривом зв'язків. [1, 5, 6]

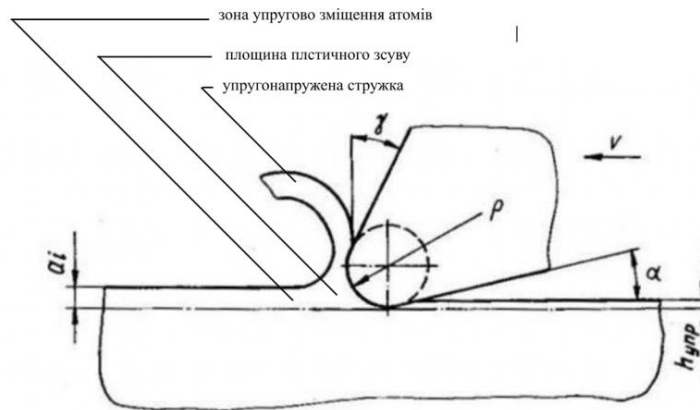


Рис.1 – Схема врізання зуба фрези при швидкісному зубофрезеруванні

Схильність оброблюваних матеріалів до деформаційного зміцнення залежить від їхньої електронної та дислокаційної структури, наявності домішок, швидкості деформування, температури, типу кристалічної решітки, радіуса заокруглення ріжучої кромки  $\rho$ , а також від швидкості перебігу процесів розміцнення. У вуглецевих сталях основною домішкою є вуглець, який, розташовуючись на межах зерен, може сприяти їхньому хрущенню. Зі зростанням температури дифузійна рухливість вуглецю зростає, що полегшує прослизання зерен, збільшує та змінює форму стружки. [3, 6, 7, 8]

Потужність різання при фрезеруванні розраховується за формулою:

$$P_c = K_p \cdot C \cdot Q \cdot W_u$$

де:  $K_p$  - постійний коефіцієнт, що залежить від оброблюваного матеріалу;  $C$  - коефіцієнт подачі, що залежить від подачі;  $Q$  - обсяг матеріалу, що видаляється, см<sup>3</sup>/сек.;  $W_u$  - Коефіцієнт зносу інструменту.

Таким чином, існує пряма лінійна залежність між потужністю різання і постійним коефіцієнтом  $K_p$ , який безпосередньо залежить від ЕДУ (енергії дефекту упаковки). І як наслідок, потужність різання залежить від енергії, яку потрібно прикласти для розриву міжатомних зв'язків. У свою чергу, внаслідок цього розриву енергія міжатомних зв'язків звільняється. Можливі шляхи використання цієї енергії при фрезеруванні розглянемо на прикладі двомасової електромеханічної системи, що здійснює імпульсне фрезерування задалегідь заданою програмою.

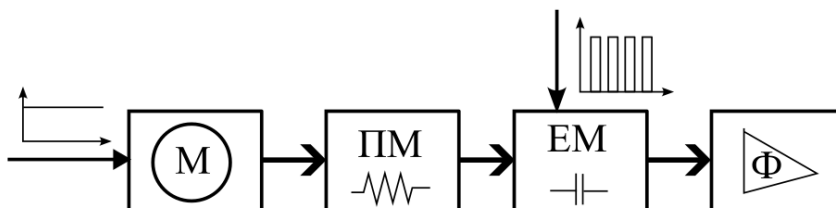


Рис.2 - Структурна схема імпульсного швидкісного зубофрезерування з використанням упругої та електромагнітної муфти

Схематично структурна схема імпульсного швидкісного зубофрезерування представлена на мал.2, де М - електродвигун, ПМ - пружна муфта, ЕМ - електромагнітна муфта, Ф - фреза. Схема реалізована із залежного обертання 2-х мас, в якій електродвигун М обертається з постійною швидкістю на номінальній потужності, а електромагнітна муфта ЕМ управляється осцилюючим сигналом і має 2 положення. Коли ЕМ замкнута, механічна передача обертаючого моменту від двигуна на фрезу заблокована і проходить накопичення обертаючого моменту за рахунок обертання валу в пружній муфті. У момент розмикання ЕМ накопичена енергія передається на фрезу Ф і використовується для її подальшого просування в заготовці. З урахуванням того, що пластична деформація і розрив міжатомних зв'язків безпосередньо залежить від потужності різання і обертаючого моменту, при імпульсному фрезеруванні можливе використання електродвигуна з меншою номінальною потужністю, ніж при класичному безперервному фрезеруванні.

Принциповий графік залежності зміни обертаючого моменту у часі зображено на Рис.3 [2, 4]

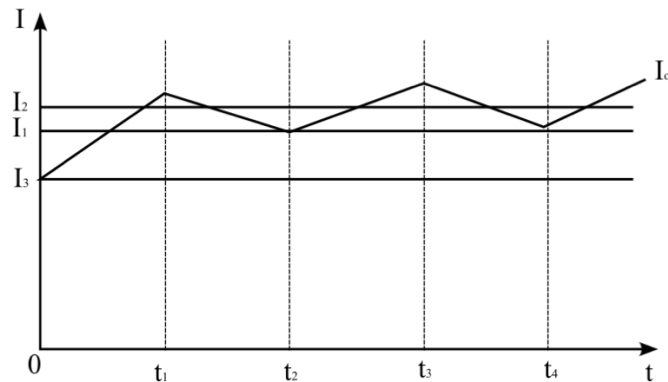


Рис.3 - Принциповий графік залежності зміни миттєвого обертаючого моменту у часі

На цьому графіку  $I_1$  – Мінімальний обертаючий момент, необхідний для виконання фрезерування (передаючий мінімальне зусилля, необхідне для розриву атомних зв'язків),  $I_2$  – Обертаючий момент при класичному фрезеруванні,  $I_3$  – Обертаючий момент, створюваний двигуном системи імпульсного фрезерування за відсутності пружної муфти  $I_0$  – Сумарний миттєвий обертаючий момент імпульсної системи, утворений обертаючим моментом двигуна і обертаючим моментом накопиченої енергії пружної муфти. У розрахунок прийнято лінійне накопичення обертаючого моменту, виходячи з закону Гука. Ділянки  $0-t_1$ ,  $t_2-t_3$  – це ділянки накопичення обертаючого моменту, (електромагнітна муфта замкнута), ділянка  $t_1-t_2$  – передача сумарного обертаючого моменту на фрезу (електромагнітна муфта розімкнена). Як бачимо з цього графіка, імпульсне фрезерування має можливість застосування двигуна меншої потужності, ніж при класичному фрезеруванні. У цій особливості полягає перший аспект енергоефективності імпульсного фрезерування..

В процесі імпульсного швидкісного зубофрезерування на ділянці  $t_1-t_2$  відбувається рух фрези з виникненням пластичних деформацій у заготовці та з розривом міжатомних зв'язків. В результаті відбувається зсув великої кількості атомних плоскостей ковзання. [1, 5] Енергія, що звільняється внаслідок розриву атомних зв'язків, частково перетворюється на теплову енергію. На ділянці  $t_2-t_3$  фреза зупиняється у заготовці, а енергія розподіляється у зоні пружного зміщення атомів. З урахуванням того, що у вуглецевих сталях зі зростанням температури дифузійна рухливість вуглецю зростає, що полегшує прослизання зерен, збільшує та змінює форму стружки. [3,5 ] на ділянці  $t_3-t_4$  для фрезерування потрібна менша потужність порівняно з фрезеруванням без зупинки фрези. У цій особливості полягає другий аспект енергоефективності імпульсного фрезерування.

Для дослідження інших аспектів імпульсного швидкісного зубофрезерування та можливе використання енергії розриву міжатомних зв'язків можлива побудова експериментальної системи, структурна схема якої

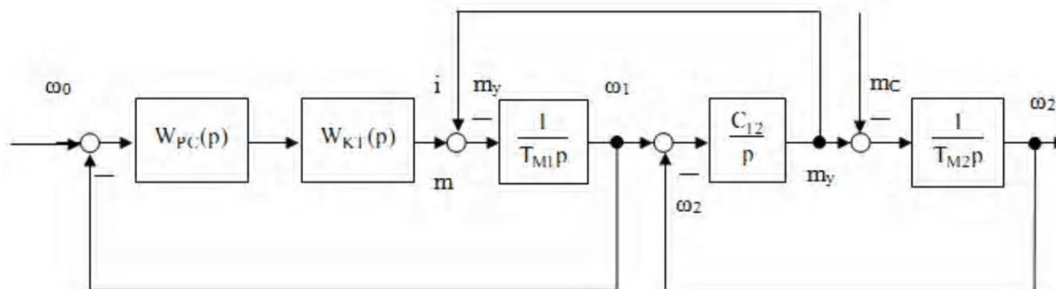


рис.4

Рис.4 – Структурна схема експериментальної установи дослідження та автоматичного регулювання двомасової системи.

У цій схемі, завдяки широкій можливості регулювання вхідного сигналу ( $m_c$ ), та можливості спостереження таких параметрів, як швидкість обертання валу двигуна, муфт та фрези ( $\omega_0$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  відповідно) і потужності на валах, що приводять, існує можливість глибокого вивчення швидкісного зубофрезерування в широкому діапазоні регулювань.

**Висновки.** Застосування атомного підходу відкриває широкі можливості вдосконалення швидкісного імпульсного зубофрезерування, зокрема, поліпшення енергоефективності фрезерування. Визначено залежності між фізичними параметрами при швидкісному зубофрезеруванні: потужності, швидкості різання, енергією розриву міжатомних зв'язків у кластерах металу. Знайдено два напрями підвищення енергоефективності імпульсного швидкісного зубофрезерування: можливе зменшення потужності електродвигуна, що приводить, і використання енергії розриву міжатомних зв'язків у подальшому фрезеруванні.

З метою подальшого глибокого вивчення можливих характеристик при швидкісному імпульсному фрезеруванні, побудовано структурну схему експериментальної установи двомасової електромеханічної системи.

#### Список літератури

1. Ключко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Майборода В.С., Охрименко О.О., Федоренко В.С. Технологічні передумови деформації і рушення зрізуємого шару при швидкісному зубофрезеруванні загартованих циліндричних зубчатих коліс на основі атомного підходу // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні № 1 (5) 2022. ISSN 2079-004X
2. О.В. Найденко, Д.С. Загуменнов Мікропроцесорне управління двомасовою електромеханічною системою // Періодичні видання національного університету «Одеська політехніка» Електротехнічні та комп'ютерні системи №34 (110) 2021. ISSN 2221-3805
3. Seppo E. Saarakkala and Marko Hinkkanen, Senior Member, IEEE Identification of Two-Mass Mechanical Systems Using Torque Excitation: Design and Experimental Evaluation // Ieee transactions on industry applications, vol. 51, no. 5, september/october 2015 с.4180-4189
4. Ключко О. О., Камчатна-Степанова К. В., Охрименко О.А., Манокhin А. С. Динаміка процесу різання при зубофрезеруванні шевронних коліс Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні № 1 (5) 2022.
5. Jianna Huang, Di Wang, Dabin Zhangb The Torque Characteristic Analysis and Simulation on Electromagnetic Gear // Energy Procedia 17 ( 2012 ) 1274 – 1280
6. Заковоротний О.Ю., Ключко О.О., Набока О.В., Степанова І.І., Храпов В.О., Рябченко С.В. Імітаційне моделювання технологічних процесів обробки великогабаритних ЕШЗ з модифікованим профілем. // 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. 44 –46.
7. Марченко А.П., Гасанов М.І., Кривобок Р.В., Ключко О.О., Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Мироненко Є.В., Шаповалов М.В. Моделювання послідовності формування поверхневого шару циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс з регламентованими вихідними параметрами // Нові та нетрадиційні технології в ресурсо - та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. – С. 213 –216.
8. Klochko A., Basova Y., Gasanov M., Zakovorotny A., Fedorenko V., Myronenko O., Vorontsov B., Ryazantsev A., Protasov R. // Scientific Basis for the Substantiation of Process Regulations for the Micro-Cutting of Hardened Gears / Alexander Klochko, Yevheniia Basova, Magomedimin Gasanov, Alexander Zakovorotny, Vitaly Fedorenko, Oleh Myronenko, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev, Roman Protasov // Journal of Mechanical Engineering - Strojnický casopis. - 2023. - Volume 73.- No. 2. – P. 83 – 92. ISSN: 2450-5471 DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0023>

#### References (transliterated):

1. Klochko O.O., Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Yu., Maiboroda V.S., Okhrymenko O.O., Fedorenko V.S. Tekhnolohichni peredumovy deformatsii i rushennia zrizuiemogo sharu pry shvydkisnomu zubofrezuvanni zahartovanykh tsylindrycheskyykh zubchatykh kolis na osnovi atomnoho pidkhidu // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni № 1 (5) 2022. ISSN 2079-004X
2. O.V. Naidenko, D.S. Zahumenov Mikroprotsesorne upravlinnia dvomasovoiu elektromekhanichnoiu systemoiu // Periodychni vydannia natsionalnoho universytetu «Odeska politekhnika» Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy №34 (110) 2021. ISSN 2221-3805
3. Seppo E. Saarakkala and Marko Hinkkanen, Senior Member, IEEE Identification of Two-Mass Mechanical Systems Using Torque Excitation: Design and Experimental Evaluation // Ieee transactions on industry applications, vol. 51, no. 5, september/october 2015 s.4180-4189
4. Klochko O. O., Kamchatna-Stepanova K. V., Okhrymenko O.A., Manokhin A. S. Dynamika protsesu rizannia pry zubofrezuvanni shevronnykh kolis Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni № 1 (5) 2022.

5. Jianna Huang, Di Wang, Dabin Zhang. The Torque Characteristic Analysis and Simulation on Electromagnetic Gear // Energy Procedia 17 ( 2012 ) 1274 – 1280
6. Zakovorotnyi O.Iu., Klochko O.O., Naboka O.V., Stepanova I.I., Khrapov V.O., Riabchenko S.V. Imitatsiine modeliuвання tekhnolohichnykh protsesiv obrobky velykohabarytnykh EShZ z modyfykovanyim profilem. // Suchasni pytannia vyrobnytstva ta remontu v promyslovosti i na transporti: Materialy Mizhnarodnoho naukovy-tekhnichnoho seminaru, 26–27 bereznia 2024 r. – Kyiv: ATM Ukrainy, 2024. – S. 44–46.
7. Marchenko A.P., Hasanov M.I., Kryvobok R.V., Klochko O.O., Kovalov V.D., Vasylychenko Ya.V., Myronenko Ye.V., Shapovalov M.V. Modeliuвання poslidoynosti formuvannya poverkhnevoho sharu tsylindrychnykh zahartovanykh krupnomodulnykh zubchastykh kolis z rehlamentovanymy vykhidnymy parametramy // Novi ta netradytsiini tekhnolohii v resurso - ta enerhozberezhenni: Materialy mizhnarodnoi naukovy-tekhnichnoi konferentsii, 6-7 hrudnia 2023 r., m. Odesa. – Odesa: 2023. – S. 213–216.
8. Klochko A., Basova Y., Gasanov M., Zakovorotny A., Fedorenko V., Myronenko O., Vorontsov B., Ryazantsev A., Protasov R. // Scientific Basis for the Substantiation of Process Regulations for the Micro-Cutting of Hardened Gears / Alexander Klochko, Yevheniia Basova, Magomedemir Gasanov, Alexander Zakovorotny, Vitaly Fedorenko, Oleh Myronenko, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev, Roman Protasov // Journal of Mechanical Engineering - Strojnický casopis. - 2023. - Volume 73.- No. 2. – P. 83 – 92. ISSN: 2450-5471 DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0023>

References (transliterated)

Поступила (received) 09.08.2024

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Гасанов Магомедємін Ісамагомедович (Hasanov Magomedemin Isamagomedovich)** – проректор по науково-педагогічній роботі, доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (096)-590-8850; e-mail: [kh.kajvika@gmail.com](mailto:kh.kajvika@gmail.com);

**Пермяков Олександр Анатолійович (Permyakov Alexandr Anatolievich)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: [perm\\_a@i.ua](mailto:perm_a@i.ua) ORCID: 0000-0002-9589-0194,

**Заковоротний Олександр Юрійович (Zakovorotniy Olexander Yuryevich)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (097) 967-3271; e-mail: [arcade@i.ua](mailto:arcade@i.ua); ORCID: 0000-0003-4415-838X

**Клочко Олександр Олександрович (Klochko Olexandr)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; e-mail: [ukrstanko21@ukr.net](mailto:ukrstanko21@ukr.net), ORCID: 0000-0003-2841-9455;

**Охріменко Олександр Анатолійович (Ohrimenko Olexandr)** – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (067) 267-69-43; e-mail: [alexhobs77@gmail.com](mailto:alexhobs77@gmail.com), ORCID: 0000-0002-5446-6987

**Майборода Віктор Станіславович (Maiboroda Viktor Stanislavovych)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>; e-mail: [maiborodavs@gmail.com](mailto:maiborodavs@gmail.com).

**Глушко Станіслав Сергійович (Stanislav Hlushko)** - аспірант кафедри Інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +380967871482 e-mail: [glushko1979@ukr.net](mailto:glushko1979@ukr.net), ORCID: 0009-0006-2459-2153;