

**КЛОЧКО 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 ЗУБОФРЕЗУВАННІ ЗАГАРТОВАНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАТИХ КОЛІС НА ОСНОВІ АТОМНОГО ПІДХІДУ**

Наукові основи технологічного регламенту вибору та призначення параметрів обробки при зубофрезеруванні базуються на основоположних теоретичних положеннях теорії про тертя, технологію машинобудування та теорію різання. Вперше науково обґрунтовано кут ковзання при пластичному відтисканні (передформування) матеріалу, коли матеріал обтікає індентор (інструмент) без відокремлення від основної маси. Визначення мінімальних кутів ковзання при обробці зубчастих великомодульних коліс методом фрезерування, виходячи з фізико-хімічних процесів механіки тертя, дозволяє значно підвищити ефективність процесу формування зубів та експлуатаційні властивості їх поверхонь. Викладено атомний підхід до процесів деформації та руйнування стружки при різанні. 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.

**Ключові слова:** швидкісне зубофрезерування, кут ковзання, радіуса заокруглення ріжучої кромки лезового інструменту, режими різання, атомна структура металів, дислокації, різання, деформація

### **KLOCHKO O.O., GASANOV M.I., ZAKOVOROTNY O.Yu., MAIBORODA V.S., OKHRIMENKO O.O., FEDORENKO V.S. TECHNOLOGICAL PREREQUISITES FOR DEFORMATION AND FAULT OF THE CUT LAYER DURING THE SPEED GEAR MILLING OF HARDENED CYLINDRICAL GEARS ON THE BASIS OF THE ATOMIC APPROACH**

The scientific foundations of the technological regulation for the selection and assignment of processing parameters during gear milling are based on the fundamental theoretical provisions of the friction theory, mechanical engineering technology and cutting theory. For the first time, the sliding angle was scientifically substantiated during plastic displacement (pre-deformation) of the material, when the material flows around the indenter (tool) without separation from the main mass. Determination of the minimum sliding angles during the processing of large-module gear wheels by milling, based on the physicochemical processes of friction mechanics, can significantly increase the efficiency of the tooth shaping process and the operational properties of their surfaces. An atomic approach to the processes of deformation and destruction of chips during cutting is presented. The resistance to plastic deformation of the cut layer depends on the type of crystal lattice of the processed material, its stacking fault energy, and the presence of impurities at the grain boundaries. The influence of these factors is manifested through the types of dissipative structures that are formed in the process of deformation of the cut layer and determine its localization.

**Key words:** high-speed hobbing, slip angle, rounding radius of the cutting edge of the blade tool, cutting conditions, atomic structure of metals, dislocations, cutting, deformation

**Вступ.** Технологічний регламент вибору та призначення параметрів обробки при зубофрезеруванні з урахуванням забезпечення необхідних параметрів поверхневого шару зубчастих коліс встановлює оптимальні умови різання, за яких забезпечується повна участь у зніманні припуску при зубофрезеруванні всіх зубів фрези [1, 2, 12, 13].

Технологічний регламент вибору та призначення параметрів обробки поширюється для зубофрезерування циліндричних дрібно модульних і великомодульних звичайної твердості 220...320HB та загартованих HRC46...63 зубчастих коліс [3, 4, 6, 22, 23]. Дослідження пластичної деформації на атомному рівні опір зсуву при різанні, з параметрами, що визначають механізми деформації різних типів кристалічних ґрат запропоновано враховувати радіус округлення ріжучої кромки  $\rho$ .

Регламент встановлює геометричні параметри черв'ячних модульних та спеціальних швидкісних немодульних дискових фрез у взаємозв'язку з технологічними режимами різання та параметрами поверхневого шару циліндричних зубчастих коліс [5, 7, 8, 11, 21].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Підвищення ефективності процесів при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом обумовлює необхідність поглиблених досліджень фізичних закономірностей, що супроводжують відокремлення шару від заготовлі.

При швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом процес пластичної деформації реалізується за схемою стиснення та простого зсуву [6, 9, 10, 14]. При цьому численними дослідженнями показано, що на верхньому кордоні (Рис. 1) зони стружкоутворення і в зоні вторинної деформації окремі зерна узгоджено формозмінюються і вишиковуються в ланцюжок у площині зсуву, утворюючи так звану текстуру (на рис. 1 видно зерно - Тита витягнуті вздовж площини зсуву).

Експериментально встановлено, що опір пластичному деформуванню в умовній площині зсуву  $\tau_{сдв}$  при обробці сталей залишається постійним, що пов'язане з деформаційним насиченням, тобто з досягненням граничного рівня деформації (зміцнення).

Зі зростанням швидкості при обробці сталей відбувається послідовна зміна виду стружки: від елементної до зливної, а далі до сегментної (суглобової). Одним із перших механізм утворення сегментної стружки при високих швидкостях різання досліджував М.І. Клушин [1, 7, 15, 20], який пов'язав це з адіабатичними умовами деформацій, тобто з температурним розміщенням, не встигає піти.

Відповідно до роботи [6, 17, 19], при високих швидкостях різання умови деформування в зоні стружкоутворення такі, що теплота від деформації в зоні локалізованого зсуву тобто дифузійні процеси не можуть реалізуватися і опір зсуву тєдв знижується.

Можливість реалізації адіабатичного зсуву [7, 18, 22] при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом пов'язана, перш за все, з низькими значеннями тепло- та температуропровідності. Внаслідок цього припускають, що нижчі значення опору зсуву титанового сплаву порівняно з  $\square$ сдв сталей, одержувані при їх різанні, обумовлені цією обставиною.

**Мета дослідження.** Дослідження технологічних умов деформації та руйнування зрізаного шару при швидкісному зубофрезеруванні загартованих циліндричних зубчастих коліс на основі атомного підходу з урахуванням обліку радіуса округлення ріжучої кромки  $\rho$ .

Традиційний розгляд пластичної деформації [6, 7] передбачає початок пластичного перебігу при напрузі плинності та враховує лише деформаційне зміцнення. Це помилкове опис є наслідком те, що теоретично градієнтів не враховані напруги пластичного течії.

**Основна частина.** Локалізація деформації та текстура в зоні стружкоутворення при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом сталі 34ХНМ на різних швидкостях:  $v = 0,5$  м/с;  $v = 4$  м/с при моделюванні формоутворення глибини залягання залишкової напруги поверхневого шару  $h_c$  враховується з урахуванням радіуса округлення ріжучої кромки  $\rho$  і сходу стружки при швидкісному зубофрезеруванні ( $\rho=0,300$  мм) залежно від кута ковзання  $\Psi_c$ .

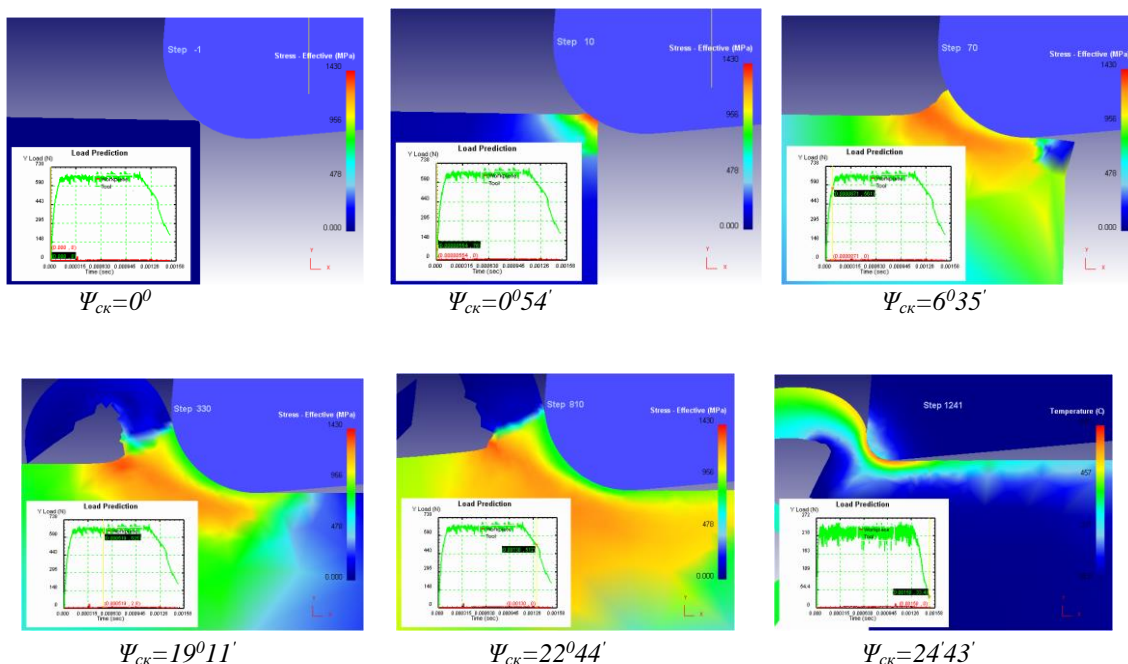


Рис. 1 – Локалізація деформації та текстура в зоні стружкоутворення при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом сталі 34ХНМ на різних швидкостях:  $v = 0,5$  м/с;  $v = 4$  м/с при моделюванні формоутворення глибини залягання залишкової напруги поверхневого шару  $h_c$  і сходу стружки при швидкісному зубофрезеруванні ( $\rho=0,300$  мм) залежно від кута ковзання  $\Psi_{ck}$

Неоднорідність напруженого стану в кристалі, що деформується, обумовлює релаксаційний характер пластичного перебігу. Гідростатичні тиски сприяють релаксації пружної напруги на межах зерен. У разі високої енергії дефекту упаковки (ЕДУ) матеріалу зерно при деформуванні повертається як ціле [6, 17]. В основі цього явища лежать відносно висока рухливість зернограничних дислокацій та виникнення у навантаженому полікристалі моментних напруг. Цей ефект залежить від оброблюваного матеріалу та стану меж зерен. Поворотні моменти, що обумовлюють поворот зерен (реалізацію ротаційної моди деформації), сприяють формуванню ланцюжка зерен, витягнутих уздовж верхньої межі стружкоутворення. У роботі [6, 12] показано, що процеси, що стримують зсувну

деформацію зерен, стримують і ковзання за межами зерен. В результаті відбувається зсув великої кількості атомних площин ковзання.

Утворення текстури свідчить про те, що в умовах специфічного напруженого стану в зоні стружкоутворення реалізується ефективна релаксація концентраторів напруг у стиках зерен, що повертаються. В результаті досягаються високі ступеня деформації [2, 6, 10] та значне внутрішньозеренне зміцнення. Отже, в таких умовах робота джерел деформації стає скорельованою і самоорганізованою, що обумовлює самовстановлення кута ковзання (зсуву) [4] і мінімум енергії, що витрачається.

Відомо, що з початковому врізанні зуба фрези в поверхневому шарі з'являється текстура (рис. 2), напрям якої збігається з головною віссю деформації розтягування. Якщо врахувати, що в безпосередній близькості від ріжучої кромки цей напрям зберігається і в поверхневому шарі, то знак залишкової напруги буде пов'язаний і з кутом текстури  $\Phi_2$ , так як  $\omega = 90^\circ - \Phi_2$ . Звідси випливає, що за  $\Phi_2 < 45^\circ$  слід очікувати залишкові напруги стиснення (рис. 3), а при  $\Phi_2 > 45^\circ$  - залишкові напруги розтягування. Наведені в таблиці результати експериментів підтверджують це положення.

У поверхневому шарі формується поле залишкової напруги, головні осі якого також не збігаються з напрямками формотворчих рухів (рис. 4).

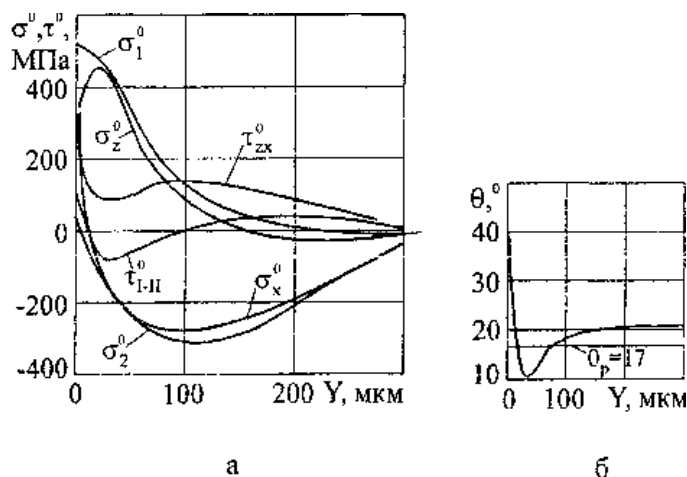


Рис. 2 – Характеристики залишкового напруженого стану

а - епюри головних  $\sigma_1^0$  і  $\sigma_2^0$ , нормальних (тангенціальних  $\sigma_z^0$  і осьових  $\sigma_x^0$ ) і дотичних  $\tau_{zx}^0$  залишкових напруг; б - кут відхилення головних осей  $\Theta$  за товщиною поверхневого шару ( $\theta_p$ -середнє інтегральне напрямом). Швидкісне зубофрезерування сталі 34ХНМ: припуск на бік  $t = 0,8$  мм;  $S_{min} = 140$  мм/хв;  $v = 3,00$  м/с;  $\rho = 0,08$  мм

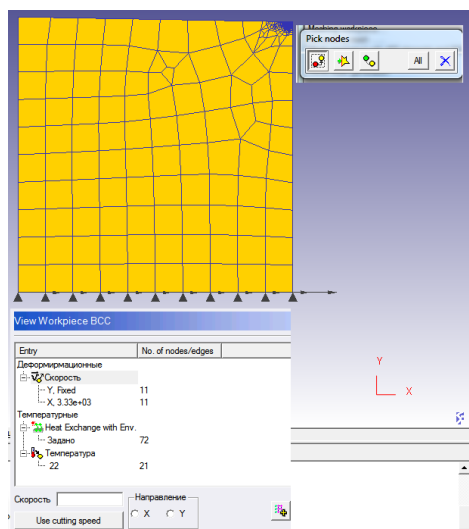


Рис. 3 – Залишкові напруження стиснення при початковому врізанні зуба фрези з урахуванням радіуса округлення ріжучої кромки при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом сталі 34ХНМ

Через війну з цих напрямках поруч із нормальними компонентами утворюється і дотична. Дотичні залишкові напруги, як і нормальні (тангенціальні та осьові) можуть бути і позитивними, так і негативними (табл. 1), а їх величина, природно, тим більша, чим більший кут відхилення головних осей від напрямку формоутворюючих рухів на вугіллі ковзання зуба фрези  $\Psi_{ск}$ .

Таблиця 1 – Знаки тангенціальної залишкової напруги, визначені по куту текстури стружки та експериментально при швидкісному зубофрезеруванні сталі 34ХНМ

Швидкість різання, м/с	Найбільша товщина зрізу а, мм	Радіус заокруглення ріжучої кромки зубів	Кут текстури	Знак залишкової напруги	
				за текстурою	експерим,
0,2	0,73	0,08	54	+	+
	0,44	0,12	48	+	+
	0,6	0,14	57	+	+
	0,15	0,16	51	+	+
1,0	0,31	0,14	51	+	+
	0,36	0,16	58	+	+
2,0	0,27	0,16	66	+	+
	0,23	0,18	56	+	+
	0,24	0,30	48	+	+
3,0	0,34	0,35	61	+	+
	0,32	0,40	52	+	+
	0,12	0,45	49	+	+

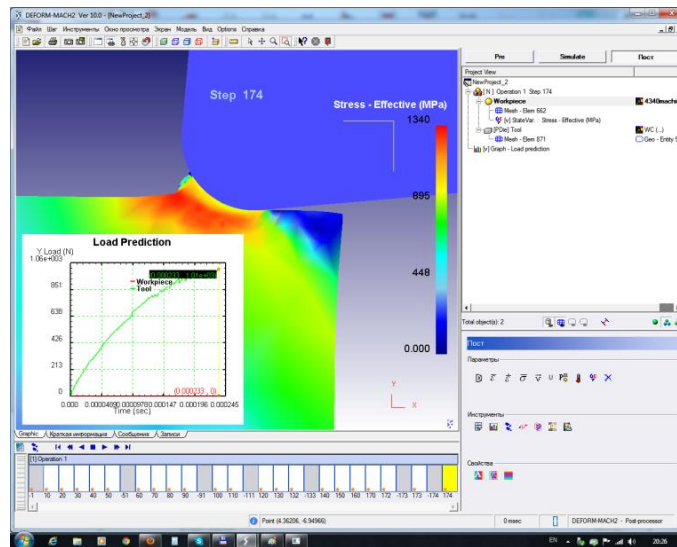


Рис. 4 – Залишкова напруга при початковому врізанні зуба фрези з урахуванням радуса округлення ріжучої кромки  $\rho$  на вугіллі ковзання  $\Psi_{ск}$  при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом сталі 34ХНМ

Примітно, що, як встановлено експериментально, на вугіллі ковзання зуба фрези при врізанні утворюються значні напруги, що розтягують, в поверхневому шарі відхилення і в міру збільшення кута ковзання при переході пружних деформацій в пластичні-зменшуються.

Безпосередній зв'язок між напругами, що виникають у зоні стружкообразования, і залишковими напругами може бути показаний при їх представленні інтенсивністю напруги, що характеризує напружений стан в узагальненому вигляді. Цей зв'язок виявляється чіткіше, якщо залишкові напруги оцінювати площею активної

частини їх епюр. Відбувається згладжування похибок визначення залишкових напруг, наявність яких неминуче через складність експерименту.

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 eВ, а міцність міжатомного зв'язку Fe-Fe — 4,290 eВ. Енергія дислокації перевищує міцність міжатомних зв'язків Fe-Fe, тому рух дислокацій супроводжуватиметься деформацією кристала, тобто розривом зв'язків. Для розриву великої кількості атомних зв'язків необхідний механізм безперервного генерування дислокацій, наприклад, джерело Франка-Ріда [1, 6, 18], дія якого пов'язана з утворенням дислокаційних петель діаметром у кілька міжатомних відстаней. У кристалі енергія деформації становить близько 0,1В на одну міжатомну відстань, а вздовж лінії дислокації. Площина ковзання для дислокації визначають як площину, в якій лежать вектор Бюргерса дислокації, і лінія дислокації. При русі крайової дислокації площиною ковзання від одного вузла грати до іншого атоми ядра дислокації здійснюють переміщення. Через війну дислокація переміщається однією міжатомне відстань  $a$ . Гвинтова дислокація може переміщатися з однієї площини до іншої. Важливою особливістю всіх видів дислокацій є те, що сильні спотворення кристалічних ґрат зосереджені в безпосередній близькості від дислокаційної лінії та в ядрі дислокації, що має свою атомну структуру [1, 7, 12].

Дислокаційні уявлення у різанні металів викладено у ряді робіт, наприклад, у [8]. Сучасні методи дослідження дислокаційної структури виконують за допомогою високовольтної електронної мікроскопії тонких фольг.

На рис. 5 представлені мікрофотографії дислокаційної структури сталі 34ХНМ при швидкісному зубофрезерованні лезовим інструментом поблизу нижньої (а) і верхньої (б) меж зони стружкоутворення (15000) з урахуванням радіуса округлення ріжучої кромки  $\rho$ .

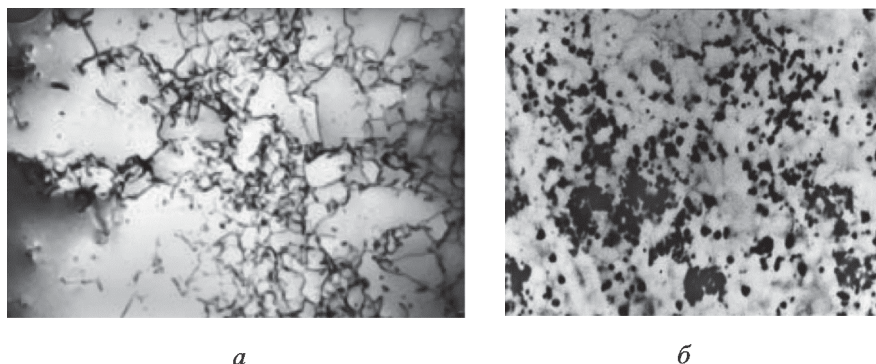


Рис. 5 – Дислокаційна структура сталі 34ХНМ при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом поблизу нижньої (а) та верхньої (б) меж зони стружкоутворення (15000) з урахуванням радіуса округлення ріжучої кромки  $\rho$

Дослідники відзначають незначний вплив швидкості деформування на опір зсуву  $\tau_{сдв}$  при обробці металів [1, 6]. Це значною мірою пов'язано як із здатністю дислокацій до фрагментації та відмінністю їх дислокацій, так і електронну структуру. На нижньому кордоні електронна структура оброблюваного матеріалу деформується пружно (без розриву міжатомних зв'язків). У міру деформації шару, що зрізається, відбувається зростання щільності дислокацій і розрив міжатомних зв'язків, тобто оброблюваний матеріал зазнає деформаційного зміцнення. Таким чином, розмір комірчастої структури виявляється запрограмованим вже на межі пружності. У зв'язку з цим при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом виявляється і залежність від межі пружності.

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 зміцнення.

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. Як зазначалося, дислокації не підтверджено термічної активації, тому ступінь деформації

Сі збільшенням швидкості, отже, і температури формується зливна стружка. Цьому сприяють дифузійні процеси на межах зерен, що полегшують поворот зерен та міжзеренну деформацію. При цьому ступінь пластичної деформації стружки знижується.

При подальшому зростанні швидкості різання формування елементарної стружки пов'язане із запізненням

пластичних деформацій.

Як зазначалося, при високих швидкостях різання відбувається запізнення пластичних деформацій і деформований стан перестає відповідати їх напруженому стану [6]. Але з урахуванням радіуса округлення ріжучої кромки при швидкісному зубофрезеруванні лезовим інструментом сталі 34ХНМ створюються технологічні умови для управління процесами обробки.

Наукові основи технологічного регламенту вибору та призначення параметрів обробки при зубофрезеруванні базуються на основоположних теоретичних положеннях теорії про тертя, технологію машинобудування та теорію різання [7, 8, 12, 14].

Процес зубофрезерування при врзанні першого зуба фрези (Рис. 6) відбувається ковзанні зуба фрези і температура в зоні різання різко зростає, що є однією з причин підвищеного зношування фрез по задніх поверхнях. Після досягнення певної товщини шару  $a_i$  на куті ковзання  $\Psi_{ск}$  процес пластичної деформації переходить у різання.

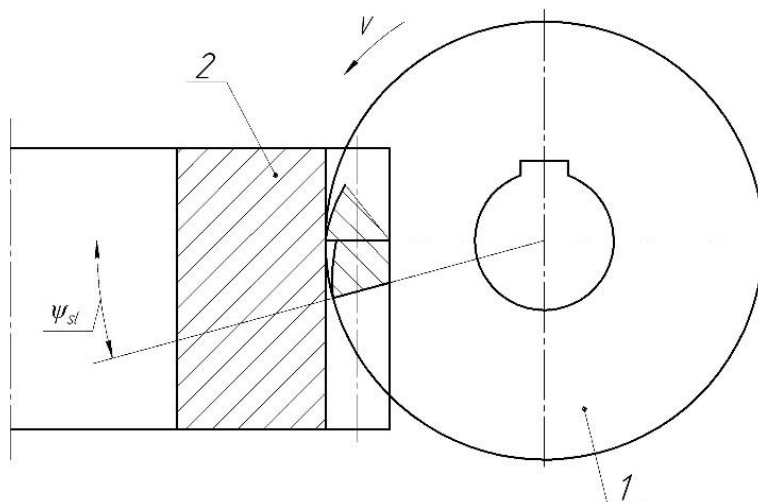


Рис. 6 – Схема зубофрезерування зубчастих коліс

У процесі зняття стружки деформація шарів оброблюваного матеріалу виникає у області площині сколювання стружки, а й попереду зуба фрези і під площиною різання.

Метал, підмінний різальним лезом, у стружку не переходить. Деформований шар після проходження різального леза визначає глибину наклепу ( $h_{np}$ ).

Тертя поверхневих шарів матеріалів, що труться, має двоїсту молекулярно-механічну природу. Тертя обумовлено об'ємним деформуванням матеріалу і подолання міжмолекулярних зв'язків, що виникають між зближеними ділянками поверхонь, що труться.

Якщо розглядати елемент, що впровадився, - індентор, який, переміщуючись у тангенціальному напрямку, деформує нижчележачий матеріал як ріжуче лезо з радіусом  $\rho$  (Рис. 7), а глибину впровадження як  $a_i$ . то глибина щодо застосування може бути представлена у вигляді (1).

Кут ковзання  $\Psi_{ск}$  відповідає пластичному відтисненню (переддеформування) матеріалу, коли матеріал обтікає індентор (інструмент) без відокремлення від основної маси.

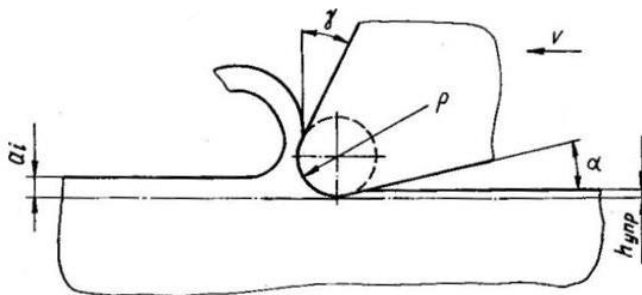


Рис. 7– Схема врзання зуба фрези при зубофрезеруванні зубчастих коліс

При поглибленні сфери в матеріал настає момент, коли відтіснення матеріалу змінюється загальмовуванням щодо індентора, що призводить до нагрівання матеріалу [1, 9, 16].

Розглянута теорія пластичності про ковзання жорсткого сферичного індентора, що впроваджується в пластично деформований простір, на межі між якими діє адгезійний зв'язок, що має міцність на зріз, визначає умови переходу пластичного відтіснення на різання:

$$\frac{h_i}{R} = \frac{a_i}{\rho} \geq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2 \cdot \tau}{\sigma_s}\right), \text{ т.е. } \frac{a_i}{\rho} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2 \cdot \tau}{\sigma_s}\right) \quad (1)$$

де  $h_i = a_i$  - товщина шару, що зрізається, мм;  $R = \rho$  - радіус ріжучого леза, мм;  $\tau$  - міцність на зріз адгезійного зв'язку, н/м<sup>2</sup>;  $\sigma_s$  - межа плинності матеріалу, н/м<sup>2</sup>.

Як випливає з (2), при  $\sigma_s \leq 2 \cdot \tau$  зовнішнє тертя неможливе за будь-якого відносного впровадження; воно також неможливе при  $h_i/R = a_i/\rho \geq 0,5$  навіть за умови нульової міцності адгезійного зв'язку на зріз [2, 4, 15, 18].

При змащуванні граничним буде відносне використання

$$h_i/R = a_i/\rho \geq 0.31$$

При порушенні зовнішнього тертя у разі  $\tau = 0$  і за наявності мастильної плівки на поверхні розділу коефіцієнт тертя залежно від відношення  $h_i/R = a_i/\rho$  визначається з молекулярно-механічної теорії тертя:

$$f = \frac{\tau_o}{p_r} + \beta + 0,4 \cdot a_r \cdot \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (2)$$

де  $\tau_o$  питома зсувна міцність молекулярних зв'язків;  $\beta$ -коефіцієнт зміцнення молекулярних зв'язків під дією стискаючих напруг;  $a_r$  - коефіцієнт гістерезисних втрат при ковзанні;  $p_r$  - тиск на фактичних майданчиках контакту.

Для нашого випадку

$$f = 0,4 \cdot \sqrt{\frac{a_i}{\rho}} \quad (3)$$

Підставляючи (3) значення  $a_i/\rho = 0.31$ , при якому неможливо зовнішнє тертя, отримаємо  $f = 0,22$ . Ця величина є граничним значенням деформаційної складової коефіцієнта тертя. При переході критичного значення, тобто. при  $f \geq 0,22$  спостерігаються стрибки стикається поверхні та індентора.

При різанні із застосуванням поверхнево та хімічно активних мастильно-охолоджуючих рідин адгезійна взаємодія між стружкою та інструментом відсутня, адгезійна складова дорівнює нулю та середній коефіцієнт тертя стає постійним, що не залежить від умов різання, тобто. при  $\tau/\sigma = f_2 \rightarrow 0: f = f_1 + f_2 \rightarrow f_1$ ,

де  $f_1$  - коефіцієнт тертя, що залежить від молекулярно-атомної шорсткості поверхонь.

Таким чином, глибина відносного впровадження, що приводить до різання, без застосування мастила відповідає: з мастилом .

Враховуючи, що початкова товщина шару, що зрізається, при формоутворенні зубів зубчастих виробів визначається як  $a_i = S_z \cdot \sin \Psi_{ck} \cdot \sin \varphi$ ,

де  $S_z$  – подача на зуб;  $\Psi_{ck}$  - кут ковзання, при якому починається різання;  $\varphi$  - кут профілю фрези в точці, що розглядається.

Задаючись конкретними значеннями  $\rho$  та  $S_z$ . визначається мінімальне значення кутів ковзання без мастила та з МОР по формулам (4) і (5):

$$\text{без МОР: } \Psi_{ck} = \arcsin \frac{0,5 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi} \quad (4)$$

$$\text{з МОР: } \Psi_{ck} = \arcsin \frac{0,31 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi} \quad (5)$$

Зміна товщини шару, що зрізається при досягненні мінімального кута ковзання  $\Psi_{скмін}$  змінює коефіцієнт тертя за наявності обов'язкового сплеску (стрибка) (Рис. 8 а, б), що несприятливо позначається на динаміку різання і якість обробленої поверхні.

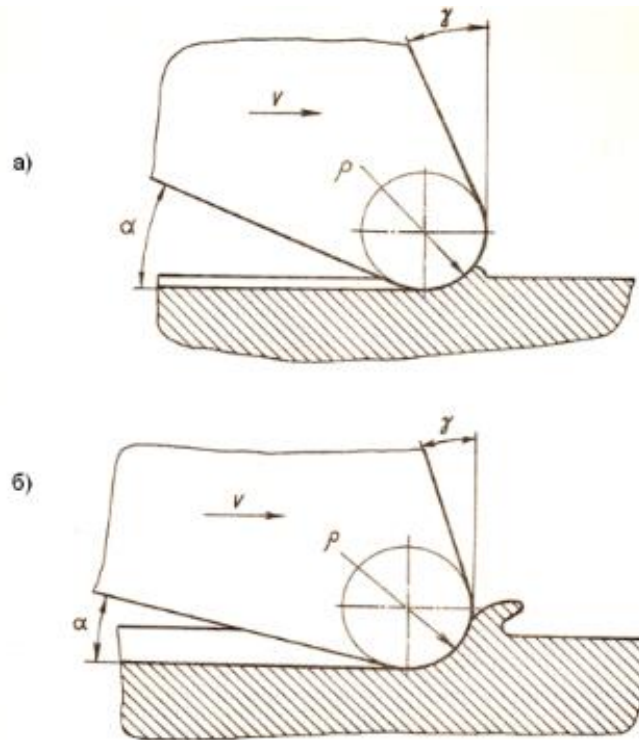


Рис. 8 – Переміщення індентора:  
а) – у разі відтіснення матеріалу; б) – переміщення індентора у разі різання

При зустрічному фрезеруванні товщина шару, що зрізається  $a_i$  визначається як відстань між двома послідовними траєкторіями точки леза, вимірюваною в напрямку радіуса фрези і визначає миттєве положення кута контакту [1, 17, 22, 23]. Товщина зрізу спрощено визначається за формулою:

$$a_i = S_{zmin} \cdot \sin \Psi_{ск} \cdot \sin \varphi, \quad (6)$$

де  $S_{zmin}$  – мінімальна подача на зуб, при якій починається процес різання.

**Обговорення.** Таким чином, початок різання при мастилі починається при  $a_i > 0.31\rho$ . Тоді, задаючись значенням  $S_{zmin}$ , визначається кут ковзання  $\psi_{ск}$ .

Ковзання відбувається на певному вугіллі ковзання  $\psi$  до тих пір, поки пластичні деформації не перейдуть з мікрорізання безпосередньо до різання, тобто. коли товщина зрізу не досягне певного значення глибини щодо впровадження ріжучим інструментом, що має радіус округлення ріжучої кромки  $\rho$ .

Таким чином, підвищення якості поверхневого шару зубчастих виробів, зниження величини шорсткості, значне збільшення продуктивності та регламентованої стійкості інструменту забезпечується за рахунок встановлення фіксованої величини подачі, при якій відношення початкової товщини зрізу до радіусу округлення ріжучої кромки фрези відповідає найменшому значенню кута.

Використання розробленого технологічного регламенту на вибір та призначення параметрів обробки при зубофрезеруванні з урахуванням забезпечення необхідних параметрів поверхневого шару зубчастих коліс встановлює оптимальні умови різання, за яких забезпечується повна участь у зніманні припуску всіх зубів фрези.



Визначення мінімальних кутів ковзання при обробці зубчастих великомодульних коліс методом фрезерування, виходячи з фізико-хімічних процесів механіки тертя, дозволяє значно підвищити ефективність процесу формування зубів та експлуатаційні властивості їх поверхонь

**Висновки.** 1. Встановлена зв'язок  $K_p$  з основними параметрами поверхневого шару, період стійкості  $T$  інструменту визначається глибиною різання  $t$ , подачею  $S_o$ , швидкістю  $V$  та радіусом округлення ріжучої кромки зубів фрез  $r$ , тобто. параметрами режиму різання та умовами формування з урахуванням параметра функціонального формування поверхневого шару при зубофрезеруванні  $K_p = f(a/r, R_z, t_m, (k)H_{ц0}, \sigma_0, h_{ц})$ .

2. Змодельовано процес визначення мінімального значення кута ковзання  $\Psi_{ск}$ , або отримання максимального значення (без застосування  $MOP$  і з  $MOP$ ), при якому процес різання відсутній з урахуванням варіювання змінних параметрів режимів різання ( $S_{мін}$ ,  $V$ ) та геометричних параметрів зуборізних фрез ( $r$ ,  $d_{фр}$ ,  $Z$ ).

3. Встановлено співвідношення між кутом ковзання  $\Psi_{ск}$  та найбільшим кутом контакту зуба фрези  $\Psi_{тах}$  з оброблюваною поверхнею дозволяє встановити ефективність процесу формування через коефіцієнт  $K_p$  (без застосування  $COЖ$  та  $COЖ$ ).

4. Показано, що сталість опору пластичному деформуванню при зсуві елемента стружки зумовлено досягненням у площині зсуву граничної щільності дислокацій, що спричиняють аморфізацію обсягів, що деформуються.

5. Основним фактором, що визначає характер залишкового напруженого стану поверхневого шару виробу, є поле напруги, створюване передньою поверхнею інструменту з урахуванням радіуса округлення ріжучої кромки зубів фрези  $r$ .

5. Орієнтація траєкторій головних деформацій, що йдуть від зони стружкоутворення за лінію зрізу, визначає знак залишкових напруг, що утворюються, а інтенсивність напруг у зоні стружкоутворення - інтенсивність залишкових напруг і ступінь зміцнення поверхневого шару. Тим самим зумовлюється взаємозв'язок між залишковою напругою та показниками зміцнення.

#### Список літератури

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н. В. Новикова, С. А. Клименко. – Москва : Машиностроение, 2014. – 608 с.;
2. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemin 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. Ключко [и др.]. – Краматорск : ДГМА, 2014. – 479 с. ISBN 978-966-379-667-3.
4. Исследование процессов зубофрезерования закаленных шевронных зубчатых колес / А.А. Ключко, 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. Кабалдин Ю.Г., Серый С.В., Кретинин О.В., Лаптев И.Л., Власов Е.Е., Кузьмишина А.М. Компьютерное моделирование и исследование наноструктур в процессах обработки резанием на основе квантово-механических расчетов. Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. 119 с.
6. Кабалдин Ю.Г., Олейников А.И., Шпилев А.М., Бурков А.А. Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием. Владивосток, Дальнаука, 2000. 194 с.
7. Шаповалов В.Ф., Печеный В.И., Ключко А.А., Пермяков А.А., Шелковой А.Н., Гасанов М.И., Анциферова О.А. Повышение качества поверхностного слоя зубьев изношенных и восстанавливаемых крупногабаритных зубчатых колес поверхностным пластическим деформированием // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – Вип. 42. – С. 91–102.
8. Гасанов М.И., Ключко А.А., Черкашина Г.И., Перминов Е.И. 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.И., Ключко О.О., Заковоротный О.Ю., Перминов С.В. Технологичный регламент оптимизации систем восстановления функциональных свойств великогабаритных открытых зубчатых 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. Ключко, 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. Ключко, М.И. 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. Ключко А.А., Гасанов М.И., 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. Опыт создания современных технологий изготовления нежестких деталей с применением передовых CAD/CAM/CAE систем / С.С. Добротворский, Е.В. Басова, М.И. Гасанов, Р.В. Головатый, С.А. Гаков, С.С. Гнучих // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 4(1113). – С. 37–40.
14. Ключко А.А. Технологическое обеспечение трения качения и трения скольжения в зубчатых передачах / А.А. Ключко, М.И. Гасанов, Е.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 40 (1149). С. 102–107. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079–004X
15. 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.

7. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. *Tehnicki Vjesnik*, 25(2), 643-648.
- 16 M. Ciavarella, On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories, *ASME J. Tribol.* 139 (2017) 021402–1-11.
17. L. Chang, Y.R. Jeng, P.Y. Huang, Modeling and analysis of the meshing losses of involute spur gears in high-speed and high-load conditions, *ASME J. Tribol.* 135 (1) (2013) 1–11 Art. no. 011504.
18. A. Diez-Ibarbia, A. Fernandez-Del-Rincon, P. Garcia, A. De-Juan, Assessment of load dependent friction coefficients and their influence on spur gear efficiency, *Meccanica* 53 (1–2) (2018) 425–445.
19. A. Clarke, H.U. Jamali, K.J. Shariff, H.P. Evans, B. Shaw, Effects of profile errors on lubrication performance of helical gears, *Tribol. Int.* 111 (2017) 184–191
- 20 J. Moss, A. Kahraman, C. Wink, An experimental study of influence of lubrication methods on efficiency and contact fatigue life of spur gears, *ASME J. Tribol.* 140 (2018) Art. no. 0511031–11.
- 21 A. Arana, J. Larranaga, I. Ulacia, Partial friction coefficient model to predict power losses in cylindrical gears, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* 233 (2) (2019) 229–255
22. Shapovalov V., Klochko A., Gasanov M., Antsyferova O., Belovol A. Optimizing the technology of reconditioning large high precision gear rims. The current state of scientific research and technology in the industry. – Kharkiv. 2018. – № 3 (3). – P. 59–70.
23. Fesenko, A., Basova, Y., Ivanov, V., Ivanova, M., Yevsiukova, F., Gasanov, M. "Increasing of Equipment Efficiency by Intensification of Technological Processes", *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.3311/PPme.13198>.

#### References (transliterated):

- Instrumenty` iz sverkhtrverdny`kh ma-terialov / pod red. N. V. Novikova, S. A. Klimenko. – Moskva : Mashinostroenie, 2014. – 608 s.;
- Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemin I. Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): *Modern trends in metalworking*, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – R. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
- Tekhnologicheskie osnovy` zuboobrabotki zakalenny`kh krupnomodul`ny`kh zubchaty`kh koles: monografiya / A. A. Klochko [i dr.]. – Kramatorsk : DGMA, 2014. – 479 s. ISBN 978-966-379-667-3.
- Issledovanie prozessov zubofrezzerovaniya zakalenny`kh shevronny`kh zubchaty`kh koles / A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Basova, S.Yu. Palashek, A.L. Nevmerzichkij // Nadi`jni`st` i`nstrumentu ta optimi`zaczi`ya tekhnologi`chnikh sistem: zb.nauk. pr. – Kramators`k : DDMA, 2017. – Vip. 40. – S. 90–101.
- Kabal'din Yu.G., Sery`j S.V., Kretinin O.V., Laptev I.L., Vlasov E.E., Kuz`mishina A.M. Komp`yuternoe modelirovanie i issledovanie nanostruktur v prozessakh obra- botki rezaniem na osnove kvantovo-mekhanicheskikh raschetov. N. Novgorod, NGTU im. R.E. Alekseeva, 2014. 119 s.
- Kabal'din Yu.G., Olejnikov A.I., Shpilev A.M., Burkov A.A. Matematicheskoe modeli- rovanie samoorganizuyushhikh prozessov v tekhnologicheskikh sistemakh obrabotki re- zaniem. Vladivostok, Dal`nauka, 2000. 194 s.
- Shapovalov V.F., Pecheny`j V.I., Klochko A.A., Permyakov A.A., Shelkovej A.N., Gasanov M.I., Anczy`ferova O.A. Povy`shenie kachestva poverkhnostnogo sloya zub`ev iznoshenny`kh i vosstanavlivaemy`kh krupnogabaritny`kh zubchaty`kh koles poverkhnostny`m plasticheskim deformirovaniem // Nadi`jni`st` i`nstrumentu ta optimi`zaczi`ya tekhnologi`chnikh sistem: zb. nauk. pr. – Kramators`k : DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 91–102.
- Gasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashina G.I., Perminov E.F. Gruppyv`e marshrutny`e tekhnologicheskie prozessy` vosstanovleniya krupnogabaritny`kh zubchaty`kh koles na osnove imitacionogo modelirovaniya s uchedom progressiruyushhikh vidov iznosa // Nadi`jni`st` i`nstrumentu ta optimi`zaczi`ya tekhnologi`chnikh sistem: zb.nauk. pr. – Kramators`k : DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 28–36.
- Gasanov M.I., Klochko O.O., Zakovorotnij O.Yu., Permi`nov Ye.V. Tekhnologi`chnij reglament optimi`zaczi`yi sistem vi`dnovlennaya funkci`onal`nikh vlastivostej velikogabaritnikh vi`dkritikh zubchatikh peredach // Vi`snik Naczi`onal`nogo tekhn`chnogo uni`versitetu «KhPI». Seri`ya: Tekhnologi`yi v mashinobuduvanni` – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. / Naczi`onal`nij tekhn`chnij uni`versitet «Kharki`vs`kij poli`tekhn`chnij i`nstitut». – Kharki`v : NTU «KhPI», 2018. – # 6 (1282) 2018. – S. 107–112. – ISSN 2079–004Kh.
- Shelkovej A.N. Obespechenie e`kspluatacionny`kh svojstv zakalenny`kh zubchaty`kh koles / A.N. Shelkovej, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // Vestnik sovremenny`kh tekhnologii: sb. nauch. tr. – Sevastopol` : FGAOU VO «Sevastopol`skij gosudarstvenny`j universitet», 2017. – Vy`p. 8. – S. 61–70.
- Funkcional`ny`e aspekty` imitacionnogo matematicheskogo modelirovaniya geometricheskikh parametrov prozessa zubofrezzerovaniya / O.M. Shelkovej, O.O. Klochko, M.F. Gasanov, D.O. Kravchenko, O.O. Ancziferova // Vi`snik NTU «KhPI». Seri`ya: Tekhnologi`yi v mashinobuduvanni`. – Kharki`v : NTU «KhPI», 2017. – # 26 (1248). – S. 66–74. – Bi`bliogr.: 6 nazv. – ISSN 2079–004Kh.
- Klochko A.A., Gasanov M.I., Basova E.V. Reglament vy`bora i naznacheniya parametrov sostoyaniya poverkhnostnogo sloya zakalenny`kh zubchaty`kh koles. Vi`snik NTU «KhPI». Seri`ya: Tekhnologi`yi v mashinobuduvanni`. – Kharki`v: NTU «KhPI», 2016. – # 33 (1205). – S. 145–157. – Bi`bliogr.: 7 nazv. – ISSN 2079–004Kh.
- Opy`t sozdaniya sovremenny`kh tekhnologii` izgotovleniya nezhestkikh detalej s primeneniem peredovy`kh CAD/CAM/CAE sistem / S.S. Dobrotvorskij, E.V. Basova, M.I. Gasanov, R.V. Golovaty`j, S.A. Gakov, S.S. Gnuchikh // Vi`snik NTU «KhPI». Zbi`rnik naukovikh prac`. Tematichnij vipusk: Tekhnologi`yi v mashinobuduvanni` – Kharki`v: NTU «KhPI», 2015. – # 4(1113). – S. 37–40.
- Klochko A.A. Tekhnologicheskoe obespechenie treniya kacheniya i treniya skol`zheniya v zubchaty`kh peredachakh / A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Basova // Vi`snik NTU «KhPI». Seri`ya: Tekhnologi`yi v mashinobuduvanni`. – Kh.: NTU «KhPI», 2015. – # 40 (1149). S. 102–107. – Bi`bli`ogr.: 8 nazv. – ISSN 2079–004X
- 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.
- Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. *Tehnicki Vjesnik*, 25(2), 643-648.
- M. Ciavarella, On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories, *ASME J. Tribol.* 139 (2017) 021402–1-11.
- L. Chang, Y.R. Jeng, P.Y. Huang, Modeling and analysis of the meshing losses of involute spur gears in high-speed and high-load conditions, *ASME J. Tribol.* 135 (1) (2013) 1–11 Art. no. 011504.
- A. Diez-Ibarbia, A. Fernandez-Del-Rincon, P. Garcia, A. De-Juan, Assessment of load dependent friction coefficients and their influence on spur gear efficiency, *Meccanica* 53 (1–2) (2018) 425–445.
- A. Clarke, H.U. Jamali, K.J. Shariff, H.P. Evans, B. Shaw, Effects of profile errors on lubrication performance of helical gears, *Tribol. Int.* 111 (2017) 184–191
- J. Moss, A. Kahraman, C. Wink, An experimental study of influence of lubrication methods on efficiency and contact fatigue life of spur gears, *ASME J. Tribol.* 140 (2018) Art. no. 0511031–11.
- A. Arana, J. Larranaga, I. Ulacia, Partial friction coefficient model to predict power losses in cylindrical gears, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* 233 (2) (2019) 229–255дж

22. Shapovalov V., Klochko A., Gasanov M., Antsyferova O., Belovol A. Optimizing the technology of reconditioning large high precision gear rims. The current state of scientific research and technology in the industry. – Kharkiv. 2018. – # 3 (3). – R. 59–70.

23. Fesenko, A., Basova, Y., Ivanov, V., Ivanova, M., Yevsiukova, F., Gasanov, M. "Increasing of Equipment Efficiency by Intensification of Technological Processes", Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 2018. <https://doi.org/10.3311/PPme.13198>

*Поступила (received) 14.02.2022*

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Клочко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr)** – доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +38067-936-36-64, e-mail: [ukrstanko21@ukr.net](mailto:ukrstanko21@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-2841-9455>;

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

**Заковоротній Олександр Юрійович (Zakovorotniy Alexander Yuryevich)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (097) 967-3271, e-mail: [arcade@i.ua](mailto:arcade@i.ua);

**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, e-mail: [maiborodavs@gmail.com](mailto:maiborodavs@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>;

**Охріменко Олександр Анатолійович (Ohrimenko Oleksandr)** – 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), <https://orcid.org/0000-0002-5446-6987>;

**Федоренко Віталій Сергійович (Fedorenko Vitaly)** – аспірант кафедри технології машинобудування та металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (095) 9159688–mail: [19fws98@gmail.com](mailto:19fws98@gmail.com).