

**ОХРИМЕНКО О.О., КАМЧАТНА–СТЕПАНОВА К.В., КЛОЧКО Л.В., ПЕРМЯКОВ Є.О., МИРОНЕНКО О.Є., ІВАНЧЕНКО В.В.**

## **АНАЛІТИЧНИЙ ПІДХІД ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ МІЦНІСНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИМЕТРИЧНИХ ЗУБЧАТИХ КОЛІС**

Поверхневий шар у процесі швидкісного зубофрезерування асиметричних циліндричних зубчастих коліс зазнає неодноразового пластичного деформування та призводить, у свою чергу, до зміни фізико-механічних властивостей та структури металу. З метою підвищення навантаженості зубців у приводах машин важкого машинобудування пропонується застосування зубчастих передач з асиметричною формою зубців яка відображає функціональну різницю передач за ГОСТ1643-81 та асиметричним профілем. Відповідно до змін, що відбуваються в поверхневому шарі, глибина зміцненого деталі зміни характеру інтерференційних ліній на рентгенограмах при пошаровому стравлюванні досліджуваної поверхні в залежності від швидкості різання. Швидкість різання постає як фактор, що визначає швидкість здійснення пластичної деформації поверхневого шару. З підвищенням швидкості деформації відбувається зростання межі міцності та межі плинності конструкційних матеріалів. Підвищення межі плинності знижує пластичність матеріалу, що обробляється і діє в бік зменшення ступеня зміцнення. З підвищенням температури та ступеня деформації швидкість перебігу процесу розміцнення, що відбувається за рахунок рекристалізації, зростає. Підвищення температури різання сприяє підвищенню інтенсивності процесу розміцнення та зменшенню ступеня зміцнення.

**Ключові слова:** Асиметричні, циліндричні, зубчасті колеса, швидкісне зубофрезерування, поверхневий шар, пластичне деформування, глибина зміцненого шару, швидкість різання, межа міцності, межа плинності

**OKHRIMENKO O.A., KAMCHATNAYA – STEPANOVA K.V., KLOCHKO L.V., PERMYAKOV E.O., MIRONENKO O.E., IVANCHENKO V.V.**

### **ANALYTICAL APPROACH FOR PREDICTING THE STATE OF STRENGTH PARAMETERS OF ASSYMETRIC GEARS**

During the process of high-speed gear hobbing of asymmetrical cylindrical gear gears, the surface layer undergoes repeated plastic deformation and leads, in turn, to a change in the physical and mechanical properties and structure of the metal. In order to increase the importance of teeth in machine drives of important machinery, the use of gears with an asymmetrical shape of the teeth is demonstrated, which reflects the functional difference of gears according to GOST 1643-81 and an asymmetrical profile. In accordance with the changes, occurring in the surface layer, the depth of the hardened layer is determined by the change in microhardness across the cross section of the part and by changing the nature of interference lines on x-ray diffraction patterns during layer-by-layer etching of the surface under study depending on the cutting speed. The cutting speed acts as a factor that determines the rate of plastic deformation of the surface layer. With increasing strain rate, the tensile strength and yield strength of structural materials increase. Increasing the yield strength reduces the plasticity of the processed material and acts in the direction of reducing the degree of hardening. With increasing temperature and degree of deformation, the rate of the softening process, which occurs due to recrystallization, increases. An increase in cutting temperature increases the intensity of the softening process and reduces the degree of hardening.

**Keywords:** Asymmetrical, cylindrical, wheel gears, high-speed hobbing, surface layer, plastic deformation, depth of the hardened layer, cutting speed, tensile strength, yield strength

**Введення.** У багатьох зубчастих передачах навантаження на один зуб значно вище і застосовується для більш тривалих періодів часу. З метою підвищення навантаженості зубців в приводах машин важкого машинобудування пропонується застосування зубчастих передач з асиметричною формою зубців яка відображає функціональну різницю передач за ГОСТ1643-81 та асиметричним профілем [2, 3]. У разі асиметричних передач стандартну симетричну зубчасту рейку оснащення змінюють шляхом зміни кута тиску на одній із бічних поверхонь. Однак такий спрощений підхід до конструкції асиметричної передачі істотно обмежує можливість максимізувати продуктивність для широкого спектра можливих застосувань цих передач.

**Мета дослідження.** Установити аналітичний підхід прогнозування стану параметрів міцності асиметричних зубчастих коліс за рахунок технологічних та конструктивних факторів, що впливають на глибину та ступеня зміцнення поверхневого шару асиметричних зубчастих коліс. [1, 2, 3, 4, 5].

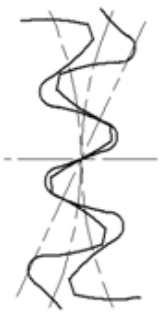
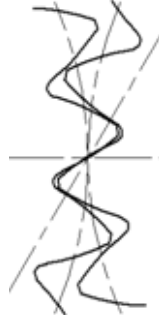
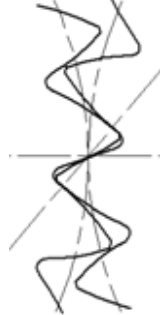

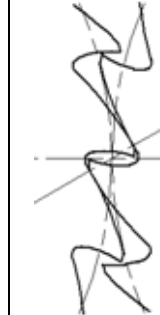
**Літературний обзор.** Альтернативний метод Direct Gear Design не обмежений попередньо обраними основними параметрами зацеплення і забезпечує асиметричну геометрію зубів шестерні, оптимізовану для конкретних додатків із зубчастою передачею [1, 3, 6, 7, 8].

У Табл. 1 представлено різні випадки передавання крутного моменту парами циліндричних зубчастих коліс з ідентичними зубчастими передачами на 24 зубці для ілюстрації двоспрямованих та односпрямованих приводів. Випадки №1 і №2. Зубці шестерні симетричні, і їхня довговічність поверхні однакова для обох бічних поверхонь зубів. Корпус №1 представляє традиційно сконструйовані кутові зубчасті колеса 25° з профілем повного радіуса. Цей випадок вважається базовим, і його контактна напруга Герца, несуче навантаження і питома ковзна швидкість приймаються як 100% для порівняння з іншими випадками передачі. Цей тип профілів зубчастих коліс використовується в аерокосмічній промисловості, оскільки вони забезпечують кращу міцність на вигин і зносостійкість поверхні бічних поверхонь порівняно зі стандартними 20° датчиками кута тиску, типовими для комерційного застосування. Корпус №2 - це симетричні шестерні з високим кутом 32°, оптимізовані методом Direct Gear Design. Його контактна напруга в Герцах менша приблизно на 8%, а питома швидкість ковзання приблизно на 6% нижча, ніж у базової шестерні. Це має забезпечити кращу бічну поверхню бічної поверхні зуба або опір скорингу. Однак навантаження на підшипник на 7% вище.

Випадок №3. Ці асиметричні шестерні призначені для передавання здебільшого односпрямованого навантаження з кутом нахилу 40°, за якого бокові поверхні зубів забезпечують 12% контактного напруження та 25% зменшення швидкості ковзання.

Водночас контактна напруга і швидкість ковзання берегових флангів близькі до цих параметрів базових передач і повинні забезпечувати таку саму навантажувальну здатність поверхні зуба, як і базові зубчасті колеса.

Таблиця 1 – Різні випадки передавання крутного моменту парами циліндричних зубчастих коліс з ідентичними зубчастими передачами

Випадок #	1	2	3	4	5
Передача навантаження	Двоспрямований		Переважно односпрямований	Односпрямований	
Навантажені боковини	обидва	обидва	привід з нижчим навантаженням	привід, винос без навантаження	Тільки привідний фланг
Профіль зуба	Симетричний (базовий)	Симетричний	Асиметричний	Асиметричний	Асиметричний
Зубчасте зачеплення					
Кут тиску, °	25	32	40/24*	46/10*	60/-**
Коефіцієнт асиметрії	1.0	1.0	1.19	1.42*	-**
Коефіцієнт контакту	1.35	1.2	1.2/1.44*	1.2/1.0	1.2/-**
Контактна напруга в герцах, %	100	92	88/102*	86/150*	94/-**
Навантаження на підшипник, %	100	107	118/99*	130/92*	181/-**
Питома швидкість ковзання, %	100	94	75/108*	68/97*	49/-**

\* для ведучого/обертального зубчастого колеса;

\*\* сітка для бічної поверхні зуба відсутня.

Цей тип передач може знайти застосування для приводів з одним основним напрямком передавання навантаження, але вони повинні бути здатні переносити більш легке навантаження протягом коротших періодів часу в протилежному напрямку.

Випадок №4. Ці асиметричні шестерні мають кут повороту на 46°, що дає змогу зменшити контактну напругу на 14% і швидкість ковзання на 32%. Недоліком таких зубів є дуже високе (+30%) навантаження на підшипник. Ці типи передач призначені тільки для односпрямованої передачі навантаження. Їхні бічні кути нахилу під кутом 10° мають незначну вантажопідйомність. Ці типи зубчастих передач можуть знайти застосування для приводів тільки з одним напрямком передавання навантаження, яке може іноді не мати контакту із зубцями бічної поверхні навантаження, як у разі зубного відскоку у високошвидкісних передачах.

Асиметричні шестерні № 5 мають тільки бічні поверхні зубів із крайнім кутом тиску 60°, без будь-яких евольвентних бічних зубів. У результаті навантаження на підшипник значне.

Вибір коефіцієнта асиметрії зубчастої передачі  $K$  дорівнює

$$K = \frac{\cos \alpha_{wc}}{\cos \alpha_{wd}}, \quad (1)$$

де:  $\alpha_{wd}$  – кут тиску приводу для ведучого зубчастого колеса,  $\alpha_{wc}$  – кут тиску приводу для обертального зубчастого колеса.

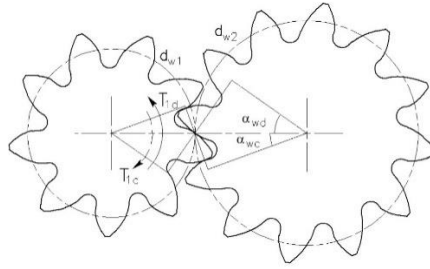


Рис. 1. Асиметрична зубчаста пара

Існує багато застосувань, наприклад, описаних у випадку №3, де шестерна пара передає навантаження в обох напрямках навантаження, але зі значно різною величиною і тривалістю (Рис.1). У цьому випадку коефіцієнт асиметрії зубчастої передачі  $K$  може бути визначений вирівнюванням потенціалу накопичення поверхневого ушкодження зуба, що залежить від робочої контактної напруги та кількості циклів навантаження на бічні поверхні зубів. Інакше кажучи, коефіцієнт безпеки контактної напруги  $S_H$  має бути однаковим для фланців приводу і берега. Цю умову можна представити як

$$S_H = \frac{\sigma_{HPd}}{\sigma_{Hd}} = \frac{\sigma_{HPc}}{\sigma_{Hc}}, \quad (2)$$

Де:

$\sigma_{Hd}$  and  $\sigma_{Hc}$  – робочі контактні напруги для приводів,  
 $\sigma_{HPd}$  and  $\sigma_{HPc}$  – допустимі контактні напруги для приводів і берегових зубів, які залежать від кількості циклів навантаження.

Потім з (2)

$$\frac{\sigma_{Hd}}{\sigma_{Hc}} = \frac{\sigma_{HPd}}{\sigma_{HPc}}. \quad (3)$$

Контактна напруга в точці кроку [5] дорівнює  $\sigma_H = z_H z_E z_\epsilon z_\beta \sqrt{\frac{F_t}{d_{w1} b_w} \frac{u \pm 1}{u}}$ ,  
 (4)

де:

$z_H = \sqrt{\frac{2 \cos(\beta_b) \cos(\alpha_{wt})}{\cos(\alpha_t)^2 \sin(\alpha_{wt})}}$  - Фактор зони, який призначений для безпосередньо спроекттованих циліндричних шестерень

$$z_H = \frac{2}{\sqrt{\sin(2\alpha_w)}}; \quad (5)$$

$z_E$  - Коефіцієнт еластичності, що враховує властивості матеріалу редуктора (модуль пружності та коефіцієнт Пуассона);  $s$

$Z_\square$  – Коефіцієнт контактного відношення, його консервативне значення для циліндричних зубчастих передач дорівнює  $Z_\square = 1.0$ ;

$Z_\square$  – Коефіцієнт спіралі для циліндричних зубчастих коліс  $Z_\square = 1.0$ ;

$F_t$  – Номінальне дотичне навантаження, при діаметрі тангажу  $d_{w1}$  is  $F_t = \frac{2T_1}{d_{w1}}$ ;

$T_1$  – Обертальний момент шестерні;

$b_w$  – Ширина контактної поверхні; Знак "+" для зовнішньої передачі, знак "-" для внутрішньої передачі.

Тоді для безпосередньо спроекттованих прямозубих шестерень контактне напруження в точці кроку може бути

$$\text{представлене як } \sigma_H = z_E \frac{2}{d_{w1}} \sqrt{\frac{2T_1}{b_w \sin(2\alpha_w)} \frac{u \pm 1}{u}}. \quad (6)$$

Тепер це рівняння можна подати для контакту приводного ведучого та відомого колеса і використовувати для рівняння (3)

$$\frac{\sin(2\alpha_{wc})}{\sin(2\alpha_{wd})} = A, \quad (7)$$

де:

$$A = \frac{T_{1c}}{T_{1d}} \left( \frac{\sigma_{HPd}}{\sigma_{HPc}} \right)^2 \quad (8)$$

- - коефіцієнт, що відображає різницю прикладеного навантаження і число циклів для фланців приводу і берега;

$T_{1d}$  і  $T_{1c}$  -  $T_{1d}$  і  $T_{1c}$  - момент обертання ведучої шестерні, прикладеної до приводу і бічних сторін зубів..

Згідно з [5] Допустима напруга за обмеженого терміну служби або коефіцієнт безпеки в обмеженому діапазоні напруг визначається з використанням коефіцієнта ZNT". Це дає змогу замінити допустимі контактні напруги в рівнянні (8) для коефіцієнтів життя

$$A = \frac{T_{1c}}{T_{1d}} \left( \frac{Z_{NTd}}{Z_{NTc}} \right)^2 \quad (9)$$

Коли визначається коефіцієнт  $A$  і вибирається кут тиску в приводі, відповідно, рівняння (7) і (1) обчислюють кут берегового тиску і коефіцієнт асиметрії.

Якщо зуби шестерні однаково навантажені як в основному, так і в зворотному напрямку обертання, то і коефіцієнт  $A$ , і коефіцієнт асиметрії  $K$  дорівнюють 1,0, а зуби шестерні симетричні.

Приклад №1: Крутний момент  $T_{1d}$  ведучої шестерні вдвічі більший за крутний момент  $T_{1c}$ . Бічна поверхня ведучого зубчастого колеса має 109 навантажувальних циклів, а бічна поверхня зубчастого колеса має 106 циклів навантаження протягом усього терміну служби зубчастої передачі. З кривої S-N [5] для сталевих передач наближене відношення коефіцієнтів життя  $Z_{NTd}/Z_{NTc} = 0,85$ . Тоді коефіцієнт  $A = 0,852/2 = 0,36$ . Припускаючи, що кут тиску в приводі дорівнює  $\omega d = 36^\circ$ , кут берегового тиску з рівняння (7) дорівнює  $\omega_c = 10^\circ$ , а коефіцієнт асиметрії з рівняння (1)  $K = 1,22$ .

У багатьох односпрямованих зубчастих передачах, таких як, наприклад, трансмісії силової системи, що видаються незворотними, бокові поверхні зубів завантажуються через інерцію системи під час сповільнення приводної системи або відскоку зуба в приводах із високим числом обертів. Така вартість бічного навантаження на зуб може бути значною і має враховуватися під час визначення коефіцієнта асиметрії  $K$ .

Якщо зубчаста передача повністю незворотна, а бічні берегові зуби ніколи не передають навантаження (випадки № 4 і № 5), коефіцієнт асиметрії визначається тільки геометрією фланця приводу. У цьому разі збільшення тиску в приводі може бути обмежено мінімальним обраним коефіцієнтом контакту і розділовим навантаженням, прикладеним до підшипників. Застосування дуже високого кута тиску в приводі призводить до зменшення кута тиску в бічному напрямку і можливого підрізання його евольвентного профілю поблизу кореня зуба. Іншим обмеженням коефіцієнта асиметрії необоротного приводу зубчастого колеса є збільшення стискаючого напруження під час вигину біля берега. Зазвичай для звичайних симетричних передач стискаюча згинальна напруга не є проблемою, тому що її допустима межа значно вища, ніж для розтягувальної згинальної напруги

**Основна частина** .При всіх методах механічної обробки асиметричних циліндричних зубчастих коліс на ступінь їх зміцнення впливатимуть силовий та температурний фактори.

Враховуючи, що майже всі інструменти (фрези, оснащені ріжучими пластинками з твердого сплаву і мінералокераміки, ролик), що застосовуються при механічній обробці асиметричних циліндричних зубчастих коліс, мають округлену робочу ділянку із заданою величиною радіусу, для визначення зміцнення поверхневого шару від силового. частини фрези сферичним індентором [3, 4, 9, 10]. При втиску сферичного індентора в поверхню матеріалу зусилля, що діє на нього, пов'язане з діаметром відбитка:

$$P = m d_0^n, \quad (10)$$

де  $d_0$ – діаметр відбитка;  $m$  і  $n$ -коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу.

Виразивши діаметр відбитка через площу пластичного відбитка, отримаємо

$$P = m \frac{4A_r}{\pi}^{n/2}. \quad (11)$$

Зусилля деформування відповідно до розробленої теорії контактної взаємодії:

$$P = c' k \sigma_T A_r. \quad (12)$$

Підставляючи (2) (3), отримаємо рівняння для визначення ступеня зміцнення:

$$k = \frac{m}{0,6c' \sigma_T} \left( \frac{4}{\pi} \right)^{n/2} A_r^{(n/2-1)}, \quad (13)$$

де  $0,6$  – коефіцієнт, що враховує перехід пластичних деформацій на основу виступів шорсткості.

Таким чином, (3) є вихідним для розрахунку ступеня зміцнення при зубофрезеруванні без урахування температурних змін [4, 6, 9].

Площа  $A_r$  у кожному даному випадку визначається умовами обробки. Коефіцієнти  $m$  і  $n$  визначаються при випробуванні на твердість за Раквеллом (HRC) при різних навантаженнях. Так, для деяких матеріалів значення цих коефіцієнтів наведено нижче:

Марка сталі:	40	45	40X	18XН3А	34ХМ	3Х13	1Х18Н9Г	38Х1Н
$m$	44	56	63	135	75	61	40	63
$n$	2,32	2,31	2,32	2,31	2,29	2,31	2,26	2,32/

При зубофрезеруванні площа контакту фрези з асиметричним циліндричним зубчастим колесом, що обробляється, що визначає ступінь зміцнення:

$$A_r = \left[ \arccos \left( 1 - \frac{\Delta h}{\rho} \right) + h_3 \frac{\Delta h_{\text{уп}}}{\sin \alpha} \right] \times \left[ \frac{t-R_z}{\sin \varphi} + 4 \arccos \left( 1 - \frac{R_z}{r} \right) \right], \quad (14)$$

де  $\Delta h$  – пружно-пластичний шар, що відтісняється, оброблюваного матеріалу;  $h_3$  – зношування по задній поверхні фрези;  $\Delta h_{\text{уп}}$  – величина пружного відновлення, що розраховується за формулою:

$$\Delta h_{\text{уп}} = 2,4(1 - \mu^2) \left( \frac{HB}{E} \right)^2. \quad (15)$$

Підставляючи (14) (15), отримаємо рівняння для розрахунку площі фактичного контакту інструменту із заготовлею при зубофрезеруванні

$$A_r = \left[ \arccos \left( 0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) + h_3 + \frac{2,4\rho(1 - \mu^2) \left( \frac{HB}{E} \right)^2}{\sin \alpha} \right] \times \left[ \frac{t-R_z}{\sin \varphi} + 4 \arccos \left( 1 - \frac{R_z}{\rho} \right) \right]. \quad (16)$$

При швидкісному зубофрезеруванні площа контакту фрези із заготовлею:

$$A_r = \left[ \arccos \left( 0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) + \frac{\pi \rho \arccos \left[ 1 - 24(1 - \mu^2) \left( \frac{HB}{E} \right)^2 \right]}{90} \right] \times \frac{\pi \rho \arccos \left( 1 - \frac{R_z}{\rho} \right)}{90}. \quad (17)$$

При ППД обробці площа фактичного контакту інструменту із заготовлею:

$$A_r = \pi R \frac{t_{\text{м исх}}}{100} \left( \frac{h_{\text{пл}}}{R_{\text{р исх}}} \right)^{v_{\text{исх}}} \times \left\{ h_{\text{киц}} \frac{180 - \arccos \frac{S - a_{\text{пл}}}{a_{\text{пл}}}}{180} + h_{\text{упр}} \left[ 1 - \frac{180 - \arccos \frac{S - a_{\text{пл}}}{a_{\text{пл}}}}{180} \right] \right\}. \quad (18)$$

Підставляючи (16) (18), отримаємо рівняння для розрахунку ступеня зміцнення при лезовій зубообробці від силового фактора:

$$k = \frac{m}{0,6c' \sigma_T} \left( \frac{4}{\pi} \right)^{n/2} \left\{ \left[ \arccos \left( 0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) + h_3 + \frac{2,4\rho(1 - \mu^2) \left( \frac{HB}{E} \right)^2}{\sin \alpha} \right] \times \left[ \frac{t-R_z}{\sin \varphi} + 4 \arccos \left( 1 - \frac{R_z}{\rho} \right) \right] \right\}^{(n/2-1)}. \quad (19)$$

Для розрахунку ступеня зміцнення від силового фактора при швидкісному зубофрезеруванні

$$k = \frac{m}{0,6c' \sigma_T} \left( \frac{4}{\pi} \right)^{n/2} \left\{ \left[ \arccos \left( 0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) \right] + \frac{\pi \rho \arccos \left[ 1 - 24(1 - \mu^2) \left( \frac{HB}{E} \right)^2 \right]}{90} \right] \times \left[ \frac{\pi \rho \arccos \left( 1 - \frac{R_z}{\rho} \right)}{90} \right] \right\}^{(n/2-1)}. \quad (20)$$

Причиною деформації поверхневого шару (а отже, і зміцнення) є те, що різання металів здійснюється зубом фрези з радіусом округлення ріжучої кромки і часткове пружне відновлення незрізаного

деформованого металу.

Так, для фрез з прецизійним доведенням по переднім і заднім поверхням, заточених алмазним кругом, радіус заокруглення ріжучої кромки зубів фрези  $\rho = 3 \dots 10$  мкм, для черв'ячних модульних фрез виготовлених із швидкорізальної сталі Р6М5, із зносом по задній поверхні ,3 мм радіус округлення ріжучої кромки зубів фрези  $= 20 \dots 60$  мкм; для черв'ячних модульних твердосплавних фрез Т15К6, ВК100М радіус заокруглення ріжучої кромки зубів фрези  $\rho = 80 \dots 450$  мкм.

Розглянуті фактори, впливаючи на деформацію поверхневого шару, виявляються в залежності від режимів різання, марки оброблюваного та інструментального матеріалів, геометрії інструменту та ін.

Таким чином, метал, що утворює поверхневий шар у процесі різання, зазнає неодноразового пластичного деформування. Це призводить, своєю чергою, до зміни всіх фізико-механічних властивостей і структури металу. Згідно з дислокаційною теорією, зміцнення металу при наклепі полягає в концентрації дислокацій біля ліній зсувів. Атомні шари у місці розташування дислокацій пружно спотворені таким чином, що виникає локальний концентратор напруги. При пластичній деформації кількість дислокацій у металі може збільшитись на кілька порядків. Якщо недеформованому металі середня щільність дислокацій  $j = 106 - 108$  см<sup>2</sup>, то наклепаном металі вона зростає до  $j = 1014$  см<sup>2</sup>. В результаті збільшення щільності дислокацій та взаємодії їх силових полів відбувається зміцнення металу при пластичному деформуванні.

Ступінь зміцнення асиметричних циліндричних зубчастих коліс характеризується глибиною пластично деформованого поверхневого шару  $h_c$  та ступенем наклепу  $N$ , що визначається за формулою

$$N = \frac{H_1 - H}{H} \cdot 100\% , \quad (21)$$

де  $H_1$  – мікротвердість деталі безпосередньо з поверхні;  $H$  – мікротвердість поверхневого шару на глибині залягання  $h_c$ .

Відповідно до змін, що відбуваються в поверхневому шарі, глибина зміцненого шару визначається або зміни мікротвердості по перерізу деталі, або зміни характеру інтерференційних ліній на рентгенограмах при пошаровому стравлюванні досліджуваної поверхні.

Що стосується зустрічного зубофрезерування формула для визначення глибини наклепанного шару має такий вигляд:

$$h_n = \frac{1 - \sin \beta}{2 \sin \beta} \cdot \sin \psi_{\bar{n}\bar{e}} , \quad (22)$$

де  $\psi_{ск}$  – кут ковзання.

Кут зсуву  $\beta$  розраховується за формуламіе

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma} \cdot \sin \psi_{\bar{n}\bar{e}} , \quad (23)$$

де  $\xi$  – усадка стружки;  $\gamma$  – передній кут фрези.

Формула (12) справедлива, коли відношення глибини відносного впровадження, що призводить до різання без застосування мастила, відповідає  $a_i/\rho \geq 0,5$ , а з мастилом –  $a_i/\rho \geq 0,31$ . Товщина шару, що зрізається  $a_i = Sz \cdot \sin \psi_{ск} \cdot \sin \varphi$ .

Швидкість різання постає як фактор, що визначає швидкість здійснення пластичної деформації поверхневого шару. З підвищенням швидкості деформації, як відомо, відбувається зростання межі міцності та межі плинності конструкційних матеріалів. Підвищення межі плинності знижує пластичність матеріалу, що обробляється і діє в бік зменшення ступеня зміцнення.

Швидкість різання визначає тривалість контакту задньої поверхні фрези із виробом. При великій швидкості різання поверхня деталі проходить через зону контакту, не отримавши ступеня зміцнення, який вона могла б отримати при малій швидкості різання та тривалішому контакті.

При підвищенні швидкості різання до деякої величини відбувається звуження пластичної зони та зменшення глибини її поширення нижче лінії зрізу. Те й інше діє у бік зменшення ступеня зміцнення.

Швидкість різання, як температурний фактор, змінює ступінь розвитку наросту при зубофрезеруванні черв'ячними модульними фрезами з швидкорізальної сталі Р6М5 і характер обтікання та підминання металу із зони стружкоутворення у бік задньої грані. Ступінь зміцнення збільшує дійсний радіус заокруглення ріжучої кромки і тим самим сприяє підвищенню наклепу [6, 10, 11, 12].

Швидкість різання впливає зміна інтенсивності процесу розміцнення. При пластичному деформуванні в поверхневих шарах металу відбуваються два одночасно протікають процеси: ступінь зміцнення та розміцнення. З підвищенням температури та ступеня деформації швидкість перебігу процесу розміцнення, що відбувається за рахунок рекристалізації, зростає. Підвищення температури різання сприяє підвищенню інтенсивності процесу розміцнення та зменшенню ступеня зміцнення.

При зустрічному зубофрезеруванні на вугіллі ковзання зуба фрези  $\psi_{ск}$  підвищення температури контакту до температури, що відповідає максимальному крихтению, сприятиме зниженню ступеня

зміцнення, а подальше підвищення температури має діяти у бік підвищення наклепу, тому що пластичність у цьому випадку підвищується.

#### **Висновки.**

- Вибір коефіцієнта асиметрії зубців зубчастого колеса К слід враховувати залежно від застосування зубчастої передачі.

- Для асиметричної пари зубчастих передач, яка має різні умови застосування навантаження у протилежних напрямках, вибір коефіцієнта асиметрії К заснований на вирівнюванні потенційного накопиченого пошкодження поверхні зуба в обох напрямках передачі навантаження.

- Для односпрямованих ланцюгових та планетарних зубчастих передач вибір коефіцієнта асиметрії К до підстав на вирівнюванні потенційного накопиченого пошкодження поверхні зубів на обох сторонах шестерні (або планетарної передачі).

- У процесі швидкісного зубофрезерування асиметричних циліндричних зубчастих коліс поверхневий шар зазнає неодноразового пластичного деформування та призводить, у свою чергу, до зміни фізико-механічних властивостей та структури металу. - Відповідно до змін, що відбуваються в поверхневому шарі, глибина зміцненого шару визначається за зміною мікротвердості по перерізу деталі та зміни характеру інтерференційних ліній на рентгенограмах при пошаровому стравлюванні досліджуваної поверхні в залежності від швидкості різання.

- Швидкість різання виступає як фактор, що визначає швидкість здійснення пластичної деформації поверхневого шару.

- З підвищенням швидкості деформації відбувається зростання межі міцності та межі плинності конструкційних матеріалів. Підвищення межі плинності знижує пластичність матеріалу, що обробляється і діє в бік зменшення ступеня зміцнення.

- З підвищенням температури та ступеня деформації швидкість протікання процесу розміцнення, що відбувається за рахунок рекристалізації, зростає. Підвищення температури різання сприяє підвищенню інтенсивності процесу розміцнення та зменшенню ступеня зміцнення.

#### **Список літератури**

1. Henriot, G. "Gears and Planetary Geartrains, Brevini, Reggio nell'Emilia, 2001
2. Kudriavtsev, V.N. "Planetary Gears, Mashinostroenie, Leningrad, 1966.
3. Kapelevich, A.L. Direct Gear Design, CRC Press, 2013.
4. Ключко А. А. Технологическое основы обеспечения процесса зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес [Текст] / А. А. Ключко, А. Н. Кравцов; Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" - Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2014 – 299 с.: ил., табл.; - (Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). ISBN 978-5-906703-02-6.
5. Шелковой А. Н. Критерии формирования структур и параметров систем обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: зб. наук. пр. Тематичний випуск : Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ ХПІ, 2013. – Вип. 8. – С. 185–200. – Укр., рос., англ. Мовами
6. Мироненко Е. В. Топография износа зубонарезного инструмента при формообразовании зубчатых реек / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск : К. : ДГМА, 2008. – Вып. 23. – С. 69–73
7. Масляная СОЖ при зубообработке: эффективность и перспективы их применения. Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов / Е. В. Мироненко, А. Г. Суслов, А. А. Ключко [и др.] // Международный информационно-технический журнал. – Харьков, 2008. – № 5. – С. 70–73..
8. Тимофеев, Ю.В. Сетевое многоуровневое представление организационно-технологических структур производственных систем / Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, Ю.Г. Гуцаленко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Збірка наукових праць. Тематичний випуск Технологія в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - №23. - С.194-213.
9. Тимофеев, Ю.В. Модернизация организационно-технологической структуры участка обработки детали «Стакан верхний» / Ю.В.Тимофеев, А.Н.Шелковой, А.А. Пермяков // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Збірка наукових праць. - Краматорськ: ДДМА. – Вип.19. – 2004. – С.75-81.
10. Magomed Hasanov, Alexander Klochko, Vadim Horoshaylo, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev Duplex Scheme of the Technological Impact of the Provision of Operational Properties of a Hardened Large Module Gears // Int. J. of Integrated Engineering Vol. 14 No. 6 (2022) p. 55-62, <http://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie>, ISSN : 2229-838X e-ISSN : 2600-7916 (Skopus)
11. . 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>.
12. Ключко О.О., Саприкіна Е.В., Федорова А.О., Мироненко О.С., Іванченко В.В. Ланцюгове логарифмічне сполучення зубчастих циліндричних передач // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023, 17–20 травня 2023 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. — Харків : НТУ «ХПІ». – С. 171.

#### **Bibliography (transliterated):**

1. Henriot, G. "Gears and Planetary Geartrains, Brevini, Reggio nell'Emilia, 2001
2. Kudriavtsev, V.N. "Planetary Gears, Mashinostroenie, Leningrad, 1966.
3. Kapelevich, A.L. Direct Gear Design, CRC Press, 2013.
4. Klochko A. A. Tekhnologicheskoe osnovy` obespecheniya processa zuboobrabotki zakalenny`kh krupnomodul`ny`kh zubchaty`kh koles [Tekst] / A. A. Klochko, A. N. Kravcov; Donbasskaya gosudarstvennaya mashinostroitel`naya akademiya; Zakry`toe akcionernoe ob-vo "ONIKS" - Kramatorsk: DGMA; Irbit: ONIKS, 2014 – 299 s.: il., tabl.; - (Seriya: «Proektirovanie i primenenie rezhushhego instrumenta v mashinostroenii» / Obshh. red. Yu.M. Solomenczev). ISBN 978-5-906703-02-6.
5. Shelkovej A. N. Kriterii formirovaniya struktur i parametrov sistem obrabotki, obespechivayushhikh zadanny`e e`kspluatatsionny`e svoystva zakalenny`kh krupnomodul`ny`kh zubchaty`kh koles / A. N. Shelkovej, E. V. Mironenko, A. A. Klochko // Vi`snik Naczi`onal`nogo

tekhni`chnogo uni`versitetu «Kharkiv`skij poli`tekhni`chnij i`nstitut» : zb. nauk. pr. Tematicnij vipusk : Suchasni` tekhnologi`yi v mashinobuduvanni`. – Kharkiv` : NTU KhPI, 2013. – Vip. 8. – S. 185–200. – Ukr., ros., angl. Movami

6. Mironenko E. V. Topografiya iznosa zubonareznogo instrumenta pri formoobrazovanii zubchaty`kh reek / E. V. Mironenko, A. A. Klochko // Nadezhnost` instrumenta i optimizaciya tekhnologicheskikh sistem: sb. nauch. tr. – Kramatorsk : K. : DGMA, 2008. – Vy`p. 23. – S. 69–73

7. Maslyanaya COZh pri zuboobrabotke: e`ffektivnost` i perspektivy` ikh primeneniya. Metalloobrabotka. Oborudovanie i instrument dlya professionalov / E. V. Mironenko, A. G. Suslov, A. A. Klochko [i dr.] // Mezhdunarodny`j informacziorno-tekhnicheskij zhurnal. – Khar`kov, 2008. – # 5. – S. 70–73..

8. Timofeev, Yu. V. Setevoe mnogourovnevoe predstavlenie organizacziorno-tekhnologicheskikh struktur proizvodstvenny`kh sistem / Yu. V. Timofeev, A. N. Shelkovej, A. A. Permyakov // Vi`snik Naczi`onal`nogo tekhnichnogo uni`versitetu "Kharkiv`skij poli`tekhni`chnij i`nstitut": Zbi`rka naukovikh prac`. Tematicnij vipusk Tekhnologi`ya v mashinobuduvanni`. – Kharkiv` : NTU "KhPI", 2005. – No 23. – S. 194–213.

9. Timofeev, Yu. V. Modernizaciya organizacziorno-tekhnologicheskoy struktury` uchastka obrabotki detali «Stakan verkhnij» / Yu. V. Timofeev, A. N. Shelkovej, A. A. Permyakov // Nadi`jni`st` i`nstrumentu ta optimi`zaczi`ya tekhnologi`chnikh sistem: Zbi`rka naukovikh prac`. – Kramatorsk: DDMA. – Vip. 19. – 2004. – S. 75–81.

10. Magomed Hasanov, Alexander Klochko, Vadim Horoshaylo, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev Duplex Scheme of the Technological Impact of the Provision of Operational Properties of a Hardened Large Module Gears // Int. J. of Integrated Engineering Vol. 14 No. 6 (2022) p. 55–62, <http://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie>, ISSN : 2229-838X e-ISSN : 2600-7916 (Skopus)

11. . 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>.

12. Klochko O.O., Sapriki`na E.V., Fedorova A.O., Mironenko O.Ye., Gvanchenko V.V. Lanczyugove logarifmi`chne spoluchennya zubchastikh czili`ndrichnikh peredach // G`nformaczi`jni` tekhnologi`yi: nauka, tekhnika, tekhnologi`ya, osvita, zdorov`ya: tezi dopovi`dej KhXKhG mi`zhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferenczi`yi MicroCAD-2023, 17–20 travnya 2023 r. / za red. prof. Sokola Ye.G. — Kharkiv` : NTU «KhPI». – S. 171.

*Поступила (received) 12.02.2023*

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Охріменко Олександр Анатолійович (Okhrimenko 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), ORCID: 0000-0002-5446-6987;

**Камчатна-Степанова Катерина Валеріївна (Kamchatna-Stepanova Kateryna)** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технологій машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-7825-1238>. E-mail: [katerina.ks@i.ua](mailto:katerina.ks@i.ua)

**Клочко Лариса Володимирівна (Klochko Larisa)** – методист Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків, Україна; тел. (096) 8295602, e-mail: [klochkoL1971@gmail.com](mailto:klochkoL1971@gmail.com), ORCID: 0009-0006-1488-0709

**Пермяков Єгор Олександрович (Permiakov Yehor)** – аспірант кафедри технологій машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (098)2309163, e-mail: [Bedger2014@gmail.com](mailto:Bedger2014@gmail.com)

**Мироненко Олег Євгенович (Mironenko Oleh)** аспірант кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: [0009-0002-6626-5629](https://orcid.org/0009-0002-6626-5629), тел. 0501028428, e-mail: [om7251975@gmail.com](mailto:om7251975@gmail.com)

**Іванченко Владислав Володимирович (Vladyслав Ivanchenko)** аспірант кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна, тел. 099 178 7915, e-mail [xenkok1997@gmail.com](mailto:xenkok1997@gmail.com).