

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗУБЧАТИХ ПЕРЕДАЧ В ЕНЕРГОМАШИНОБУДУВАННІ****О.Якімов***Одесский национальный политехнический университет***С.Уминський***Одеський державний аграрний університет***Н.Кліменко, Л.Бовнегра, Ю.Шихирева***Одесский национальный политехнический университет*

*Розвиток сучасного енергомашинобудування йде по лінії неперервного підвищення швидкостей, коефіцієнта корисної дії і потужностей агрегатів. Зубчасті передачі та редуктори є відповідальними частинами сучасних механізмів і займають важливе місце в вітчизняному енергомашинобудуванні. Міцність і зносостійкість зубчастих передач, крім конструктивних факторів, залежить і від технологічних прийомів обробки. Заключним етапом виготовлення таких коліс є операція зубошліфування. В процесі зубошліфування в тонкому поверхневому шарі відбуваються складні термомеханічні процеси. В результаті короткочасного нагрівання до високих температур в такому поверхневому шарі виникають структурні перетворення, прижоги, а в деяких випадках навіть мікро і макротріщини. Крім того, мають місце випадки виготовлення зубчастих коліс з прихованими дефектами шліфування (наприклад, появлення в поверхневому шарі зубів великих розтягуючи напруг), що знижує ресурс роботи, а в окремих випадках викликає поломку зубів в умовах експлуатації. Розробка ефективних заходів по забезпеченню якості поверхневого шару на операції зубошліфування багато в чому залежить від можливості прогнозування (або розрахунку) температур і залишкових напружень по глибині цементованного шару зубів. Запропоновано методику розрахунку внутрішніх залишкових напружень виникаючих при зубошліфуванні коліс з цементуємих сталей. На основі виконаних розрахунків і експериментів запропоновані і обгрунтовані шляхи підвищення якості виготовлення робочих поверхонь зубчастих передач, що застосовуються в агрегатах теплових і атомних електростанцій.*

**Ключові слова:** *цементований шар, залишкові напруги, тверде мастило, переривчасте коло.*

**Вступ.** Розвиток сучасного енергомашинобудування йде по лінії неперевного підвищення швидкостей, коефіцієнта корисної дії і потужності агрегатів. У всіх випадках, коли оптимальне число обертів двигуна агрегату значно відрізняється від числа обертів виконавчого механізму, застосовується зубчастий редуктор. Зубчасті передачі та редуктори є відповідальними частинами сучасних механізмів і займають важливе місце у вітчизняному енергомашинобудування. Міцність та зносостійкість зубчастих передач, крім конструктивних факторів, у великій мірі залежить і від технологічних прийомів обробки.

**Проблема.** Важконавантажені зубчасті колеса виготовляють з цементуємих хромонікелевих і хромонікельвольфрамових сталей 12ХН3А, 12Х2Н4А, 20Х2Н4А і 18Х2Н4МА. Заключним етапом виготовлення таких коліс є операція зубошліфування. В процесі зубошліфування в тонкому поверхневому шарі відбуваються складні і своєрідні термомеханічні процеси. В результаті короткочасного нагрівання до високих температур в такому поверхневому шарі виникають структурні перетворення, з так звані прижоги, а в деяких випадках навіть мікро і макротріщини. Крім того, мають випадки виготовлення зубчастих коліс з прихованими дефектами шліфування (наприклад, поява в поверхневому шарі зубів великих розтягуючи напруг), що знижує ресурс роботи, а в окремих випадках викликає поломку зубів в умовах експлуатації. Розробка ефективних заходів щодо забезпечення якості поверхневого шару на операції зубошліфування багато в чому залежить від можливості прогнозування (або розрахунку) температур і залишкових напружень по глибині цементованного шару зубів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Питанням математичного моделювання теплового і напружено-деформованого стану ма-териала деталі при шліфуванні присвячені роботи [1-6]. Питанням аналітичного визначення значень розтягуючих залишкових напружень з урахуванням неоднорідності вмісту вуглецю в цементованном шарі не приділено достатньої уваги. У роботах [7,8] аналізуються причини утворення поверхневих прижогов і тріщин при шліфуванні цементуємих зубчастих коліс. У цих роботах шкідливі наслідки шліфування пропонується зменшувати за рахунок оптимізації параметрів режиму різання, а питання формування напружено-деформованого стану поверхневого шару при абразивній обробці розглядаються в основному з якісної сторони або присвячені експериментальному дослідженню залишкових напружень.

**Мета досліджень.** Розробити методику розрахунку температур і залишкових напружень на різних рівнях цементованого шару, що виникають при зубошліфуванні, і запропонувати шляхи поліпшення теплового і напружено-деформованого стану поверхневого шару зубів при абразивній обробці.

**Результати досліджень.** У поверхневих шарах цементованих деталей при шліфуванні формуються напруження різної величини і знака. Залишкові напруги виникають в результаті взаємодії пластично і пружно-деформованих шарів. Якщо пластично деформовані шари після охолодження прагнуть

збільшити свою довжину в порівнянні з вихідною, то пружно-деформовані шари прагнуть повернутися до вихідної довжини. Отже, одні шари будуть відчувати напруги стиснення, а інші - розтягування. Ці напруги залишаються в деталі після шліфування і тому називаються залишковими. Основною небезпекою при шліфуванні є виникнення залишкових напруг значної величини, що може привести до розтріскування поверхневого цементованого шару. Причиною виникнення залишкових напруг при шліфуванні при незмінному фазово-структурному складі цементованого шару є температура шліфування, яка призводить до нерівномірного теплового розширення його окремих мікрошарів, що і викликає виникнення залишкових напружень. При розрахунку температур шліфування необхідно враховувати дві обставини:

1. Інтенсивність теплового потоку нерівномірно розподілена по плямі контакту шліфувального круга з деталлю. На початку траєкторії проходження ріжучого зерна в оброблюваному матеріалі інтенсивність теплового потоку менше, а в кінці траєкторії, де перетин стружки максимальний, вона вище. Таким чином, необхідно визначити температуру поверхні різання з урахуванням щільності теплового потоку, нерівномірно розподіленої по плямі контакту шліфувального кола з металом.

2. Представляє практичний інтерес визначення температур, що виникають не тільки на поверхні різання (тобто на поверхні, на якій в даний момент відбувається стружкоутворення), але і на обробленій поверхні, розташованій під поверхнею різання. Крім того, для розрахунку теплових залишкових напруг необхідно знати, як розподіляються температури вглиб цементованого шару. Для вирішення першого завдання виберемо систему координат  $X, Y, Z$  на поверхні напівнескінченного тіла. Домовимося, що тепло підводиться до деякої області, обмеженою прямокутником, сторони якого паралельні вісям  $X$  і  $Y$ :

$-a \leq x \leq a, -b \leq y \leq b$ , де  $a = \frac{\sqrt{D_{kp} \cdot t}}{2}$ ,  $b = \frac{S}{2}$ ,  $D_{kp}$  – діаметр шліфувального кола,  $t$  – глибина шліфування,  $S$  – поперечна подача. За межами цієї ділянки тепловий потік крізь поверхню деталі відсутній. Глибина шліфування, – поперечна подача. Поза цією областю тепловий потік через поверхню деталі відсутня. Джерело тепла вважаємо нерухомим, а поверхню оброблюваної деталі рухомою зі швидкістю  $V_\partial$  в напрямку зменшення координати  $x$ . Розглянемо усталений тепловий режим, коли  $\tau \rightarrow \infty$ . Для елементарної площі  $D = dx \cdot dy$  з центром з координатами  $x, y$  розподіл температур описується залежністю [9]:

$$T_1(z) = \frac{q(x)}{2\pi\lambda_1} \cdot \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{V_\partial \cdot r + V_\partial \cdot (x_0 - x)}{2a_1\tau}\right), \quad (1)$$

де  $T_1$  – температура на поверхні різання, °С;  $x, y, z$  – текущі координати положення деталі, м;  $q(x)$  – питома інтенсивність теплового потоку в даній точці плями контакту шліфувального круга з деталлю, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності поверхні різання, Вт/м·°С;

$R = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + z^2}$  – радіус-вектор координат;  $V_\delta$  – швидкість переміщення деталі щодо нерухомого теплового джерела, м/хв;  $\tau$  – момент часу, с;  $x_0$  – координата в момент часу  $\tau_0$ , м;  $r$  – радіус заокруглення різального зерна, м;  $a_1$  – коефіцієнт теплопровідності поверхні різання, м<sup>2</sup>/с.

Інтегруючи вираз (1) по області  $D$ , отримуємо:

$$T_1(z) = \frac{1}{2\pi\lambda_1} \int_{-a}^{+a} q(x) dx \int_{-b}^{+b} dy \left\{ \frac{1}{R} \cdot \exp \left[ -\frac{V_\delta r + V_\delta (x_0 - x)}{2a_1\tau} \right] \right\}, \quad (2)$$

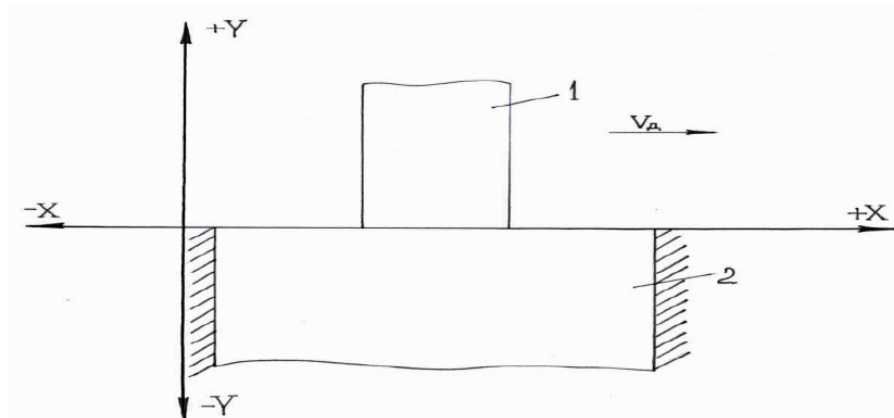
де  $a, b$  – пошуририна і напівдовжина плями контакту круга з деталлю, м.

Для вирішення другого завдання, то єсть для приведення температури на по-верхні різання до температури обрабленої поверхні, можна представити, що по цій поверхні рухається якесь тіло, нагріте до температури  $T_1$  і складається з матеріалу деталі, абразивних зерен і зв'язки кола. Кожна точка обрабленої поверхні знаходиться в контактi з даним тілом протягом проміжка часу

$\tau = \frac{\sqrt{D_{kp} \cdot t}}{V_\delta}$ . Для спрощення завдання можна уявити, що два напівобмежені тіла

з теплоізолюваними бічними поверхнями в початковий момент часу наведені в зіткнення один з одним. Температура першого тіла дорівнює температурі поверхні різання  $T_1$ , а температура другого тіла дорівнює температурі обрабленої поверхні  $T_2$ . Необхідно знайти температуру другого тіла в моменти

часу від  $\tau = 0$  до  $\tau = \frac{\sqrt{D_{kp} \cdot t}}{V_\delta}$ .



**Рис.1.** Схема для розрахунку температури на обрабленої поверхні: 1 і 2 - ті-ла, що мають в початковий момент часу температури, рівні температурі поверхні різання і обрабленої поверхні відповідно.

Таким чином, завдання зводиться до вирішення рівняння теплопровідності при граничних умовах 4-го роду, що відповідає контакту двох твердих тіл з різною температурою. Диференціальне рівняння теплопровідності запишеться наступним чином:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1(z, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \cdot \frac{\partial^2 T_1(z, \tau)}{\partial z^2} \geq 0; z \geq 0 \\ \frac{\partial T_2(z, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \cdot \frac{\partial^2 T_2(z, \tau)}{\partial z^2} \geq 0; z \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Граничні умови:

$$\begin{aligned} T_1(z, 0) &= f_1(z); T_2(z, 0) = f_2(z) \\ \frac{\partial T_1(+\infty, \tau)}{\partial z} &= \frac{\partial T_2(-\infty, \tau)}{\partial z} = 0 \\ T_1(+0, \tau) &= T_2(-0, \tau) \\ \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial z} &= -\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{\partial T_2(0, \tau)}{\partial x} \end{aligned} \quad (4) \quad \text{при } 0 \leq \tau \leq \frac{\sqrt{Dt}}{V_d},$$

де  $\lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності обробленої поверхні, Вт/м·°С. Використовуючи перетворення Лапласа, зводимо систему (4) диференціальних рівнянь до системи алгебраїчних квадратних рівнянь. Рішення для зображення має вигляд:

$$\begin{aligned} T_{L1}(z, s) - \frac{T_{01}}{s} &= B_1 \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{a_1}}z\right), \quad z \geq 0 \\ T_{L2}(z, s) &= B_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{a_2}}|z|\right), \quad z \leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

де  $a_2$  – коефіцієнт температуропровідності обробленої поверхні, м<sup>2</sup>/с. Остаточні рішення для зображень буде:

$$\begin{aligned} T_{L1}(z, s) &= \frac{T_0}{s} - \frac{T_0}{(1 + K_\varepsilon)s} \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{a_1}}z\right), \quad z \geq 0 \\ T_{L2}(z, s) &= \frac{K_\varepsilon T_0}{(1 + K_\varepsilon)s} \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{a_2}}|z|\right), \quad z \leq 0 \end{aligned}$$

де  $K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\sqrt{\lambda_1 c_1 \gamma_1}}{\sqrt{\lambda_2 c_2 \gamma_2}}$  – відношення коефіцієнтів теплової активності

дотичних тіл, теплового джерела і обробленої поверхні.

Переходячи до таблиць зображень, маємо:

$$\frac{T_2(z, \tau) - T_{02}}{T_{01} - T_{02}} = \frac{K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} \operatorname{erfc} \frac{|z|}{2\sqrt{a_2 \tau}}$$

або

$$T_2(z, \tau) = (T_{01} - T_{02}) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \operatorname{erfc} \frac{|z|}{2\sqrt{a_2 \tau}} + T_{02}$$

Вважаючи,  $T_{02} = 0$  отримаємо:  $T_2(z, \tau) = \frac{T_{01} \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \operatorname{erfc} \frac{|z|}{2\sqrt{a_2 \tau}}$ .

враховуючи, що  $\operatorname{erfc} = (1 - \operatorname{erf})$  отримаємо:

$$T_2(z, \tau) = \frac{T_{01} \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{|z|}{2\sqrt{a_2 \tau}} \right), \text{ де } T_{01} = T_1 - \text{температура на поверхні різання, } ^\circ\text{C.}$$

Таким чином, з огляду на температуру на поверхні різання (2), температура шліфування  $T_2(z, \tau)$ , приведена до обробленої поверхні, яка враховує, що потужність теплового джерела нерівномірно розподілена по плямі контакту й шліфовального круга з деталлю і теплова потужність в даній точці плями контакту залежить від конкретної координати  $x$ , і дорівнює:

$$T_2(z, \tau) = \frac{\varepsilon_1 \cdot \int_{-a}^{+a} q(x) dx \int_{-b}^{+b} dy \left\{ \frac{1}{R} \cdot \exp \left[ -\frac{V_{\text{д}} r + V_{\text{д}} (x_0 - x)}{2a_1 \tau} \right] \right\}}{2\pi\lambda_1(\varepsilon_2 + \varepsilon_1)} \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{z}{2\sqrt{a_2 \tau}} \right), \quad (6)$$

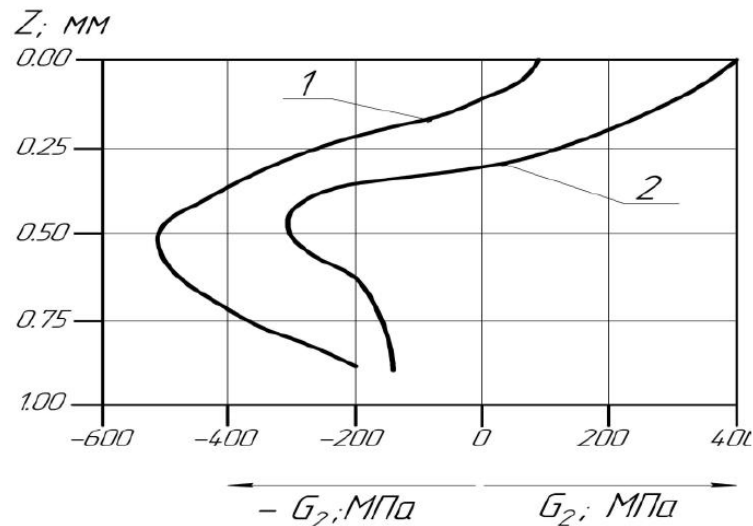
де  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – коефіцієнти теплової активності відповідно теплового джерела і обробленої поверхні,  $\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

Величини залишкових напруг, що виникають на різних рівнях цементованого шару, можна визначити, користуючись виразом:

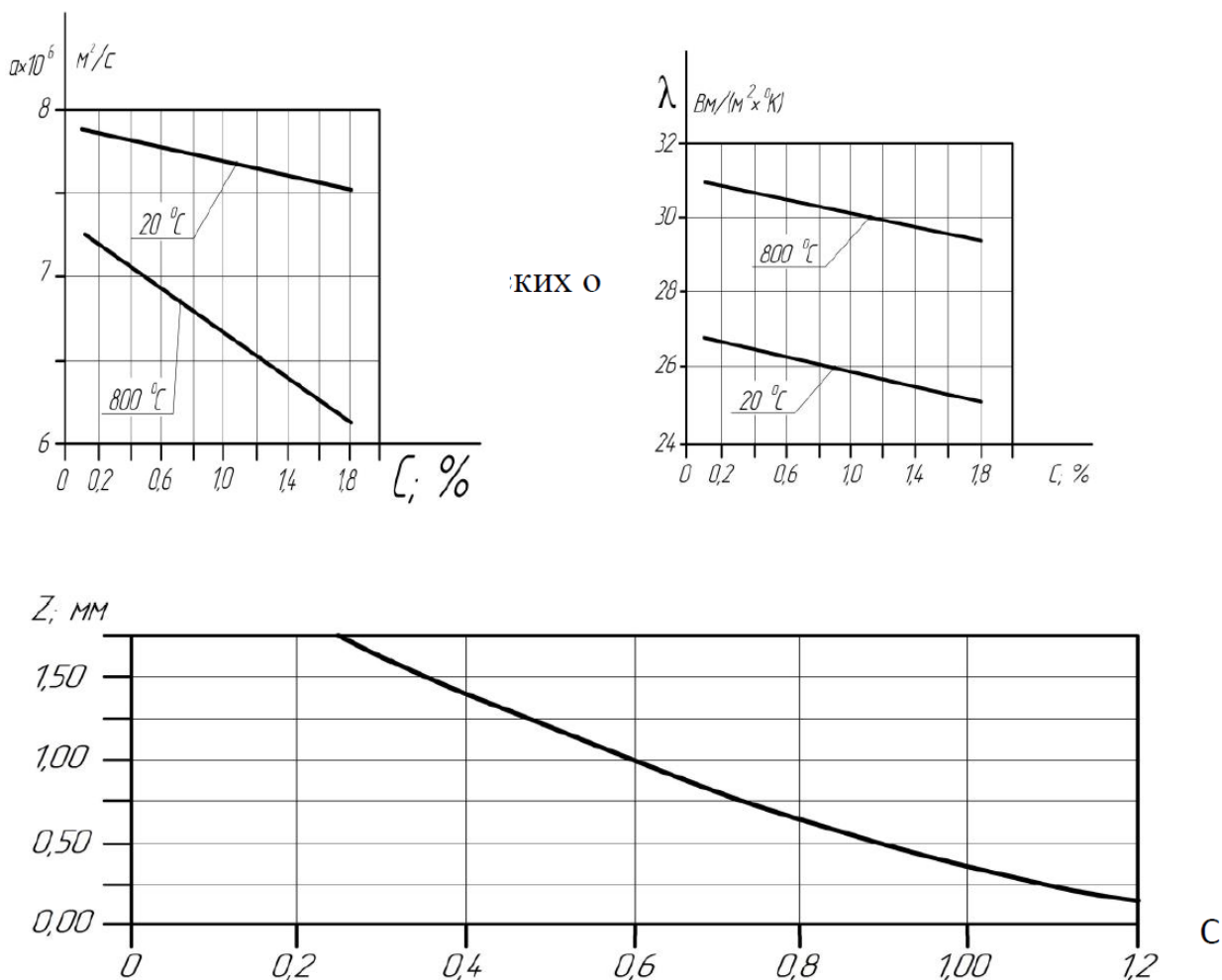
$$G_2(z) = \frac{E_2 \alpha_2 \varepsilon_1 \int_{-a}^{+a} q(x) dx \left\{ \frac{1}{R} \cdot \exp \left[ -\frac{V_{\text{д}}^2 r + V_{\text{д}}^2 (x_0 - x)}{2 \cdot a_1 \cdot \sqrt{D_{\text{кр}} \cdot t}} \right] \right\} \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{z \cdot \sqrt{V_{\text{д}}}}{2\sqrt{a_2 \sqrt{D_{\text{кр}} \cdot t}}} \right)}{(2 - 2 \cdot \mu_2) \cdot 2\pi\lambda_1(\varepsilon_2 + \varepsilon_1)} \quad (7)$$

де  $E_2$  – модуль пружності цементованого шару, Мпа;  $\alpha_2$  – лінійний коефіцієнт термічного розширення цементованого шару,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $\mu_2$  – коефіцієнт Пуассона цементованого шару. На рис.2 наведені розрахункові криві, що описують розподіл внутрішніх залишкових напружень по глибині цементованого шару після шліфування сталі 18Х2Н4ВА з глибинами різання  $t = 0,1 \text{ мм}$  (без охолодження) и  $t = 0,015 \text{ мм}$  (з охолодженням). З графіків видно, що в міру віддалення від поверхні розтягуючі напруги зменшуються і переходять в стискаючі. При шліфуванні по найбільш жорсткого режиму (крива 2) стискаючі напруги мають найменше значення. Поява розтягуючих напруг при шліфуванні зубчастих коліс призводить до зниження їх втомної міцності.

Теплофізичні параметри оброблюваного матеріалу залежать від кількості вуглецю в цементованом шарі. Вуглець в цементованом шарі розподілено нерівномірно (рис.3).



**Рис.2.** Розподіл внутрішніх залишкових напружень по глибині цементованого шару для двох режимів шліфування:  $t = 0,015$  мм и  $t = 0,1$  мм.



**Рис.3.** Залежності теплофізичних параметрів ( $\alpha$ ,  $\lambda$ ) сталі 18X2H4BA від кількості вуглецю в поверхневому шарі [10] при різних температурах і розподілення вуглецю по глибині цементованого шару [8].

З рис.3 видно, що підвищення концентрації вуглецю в поверхневому шарі зменшує температуропровідність ( $\alpha$ ) і теплопровідність ( $\lambda$ ) обробляемого матеріала. Розрахунок внутрішніх залишкових напружень проводився з урахуванням графіків  $\alpha = f(c)$ ,  $\lambda = f(c)$ . Появі шліфувальних тріщин сприяють не тільки залишкові, а й тимчасові напруги розтягнення, які виникають в

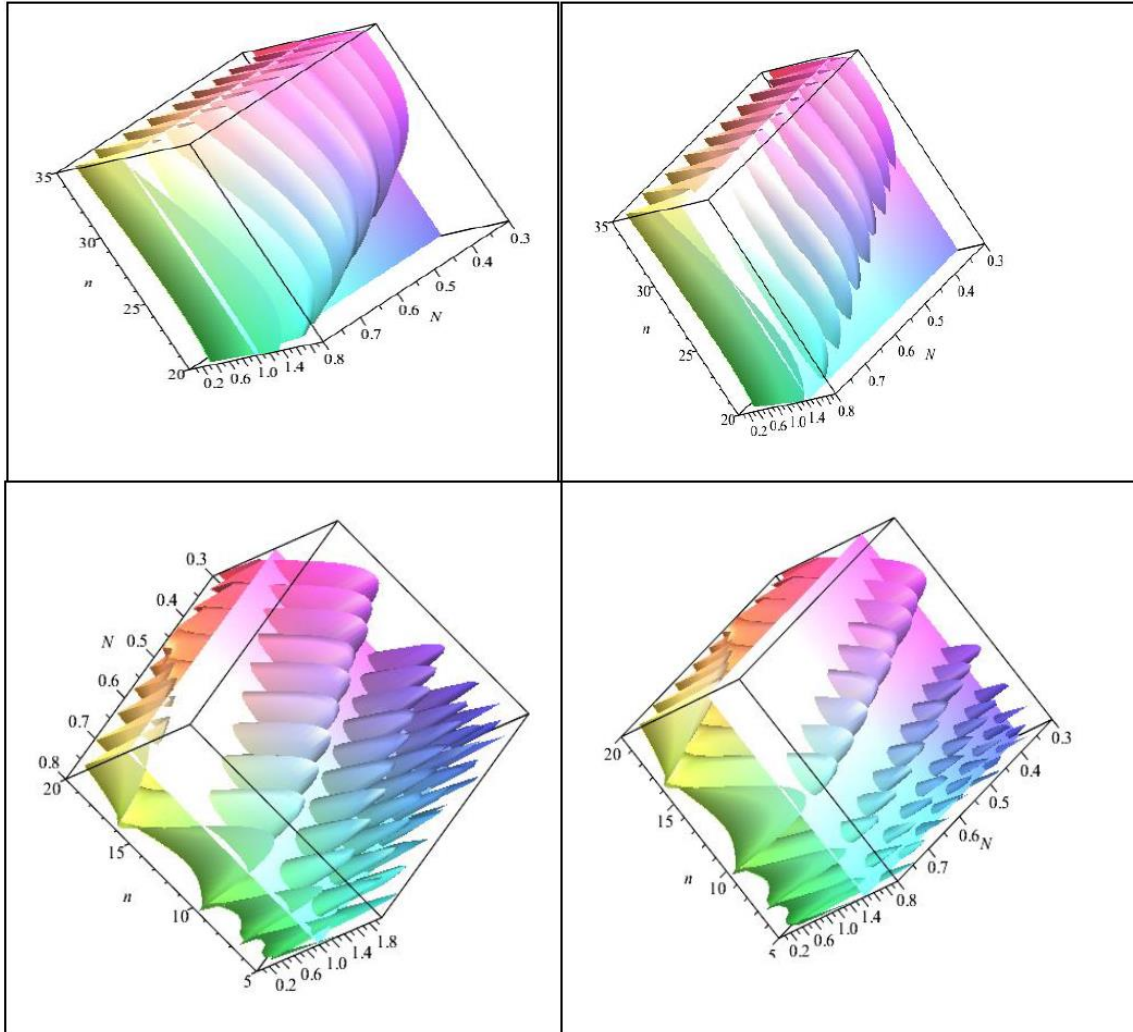
процесі шліфування при охолодженні до температур початку мартенситного перетворення [11]. Причиною утворення тріщин є високі контактні температури і температурний градієнт в зоні різання, а також високі швидкості охолодження оброблюваної поверхні після виходу її з зони контакту з абразивним кругом. Для зменшення внутрішніх розтягуючих напруг і ймовірності утворення тріщин необхідно всьома доступними засобами зменшувати температуру в зоні різання і швидкість охолодження [11]. Цього можна домогтися застосуванням в якості мастильно-охолоджуючих засобів твердого змащення [12], компоненти складу якої взято в наступних процентних співвідношеннях : стеаринова кислота (60 - 65%), олеїнова кислота (20 - 25%), ацетамід ( інше). Пропоноване змащення, володіючи високою змащуючою здатністю, значно знижує контактні температури шліфування при досить низькій швидкості охолодження поверхневих шарів деталей, що забезпечує зменшення внутрішніх розтягуючих напруг, виникаючих в процесі шліфування [12]. Іншим ефективним засобом зниження контактних температур може служити переривчасте шліфування [13]. При певних умовах робота кола з переривчастою робочою поверхнею може викликати в пружною системі верстата параметричний резонанс, що знижує якість поверхневого шару оброблюваної деталі. Параметрична нестійкість пружної системи шліфувального верстата визначається з умови [14]

$$|L| > \frac{M+1}{2}, \quad (8)$$

де  $L$  і  $M$  – параметри, що залежать від наведених мас і жорсткості пружної системи верстата, ріжучої здатності шліфувального круга, кількості і розмірів западин і ріжучих виступів на робочій поверхні абразивного інструменту, діаметра і окружної швидкості кола, а також параметра, характеризуючого затухаючі коливання у часі . На рис.4 показані області параметричної стійкості пружної системи верстата (плоскі кольорові ділянки), розраховані для переривчастого шліфування без застосування мастильно-охолоджуючих засобів (два лівих просторових графіка) і з застосуванням твердого змащення (два правих графіка). Розширення зон стійкої роботи пружної системи верстата при шліфуванні із застосуванням твердого змащення пояснюється поліпшенням ріжучої здатності абразивного інструменту в порівнянні з «сухим» шліфуванням. З зіставлення двох просторових графіків, розташованих в нижній частині рис.4, слідує, що в інтервалі зміни чисел ріжучих виступів на переривчастому колі  $5 \leq n \leq 20$  розміри областей стійкої роботи при шліфуванні з твердим мастилом на 35% більше, ніж при «сухому» шліфуванні. Площа цих областей збільшилася через зменшення площ зон нестійкої роботи пружної системи верстата, тобто за рахунок зменшення площ підстав «горбів», що лежать в площині, описуваної параметром  $\frac{M+1}{2}$  (правою частиною нерівності (8)). На рис.5 наведені експериментальні дані по вимірах питомої величини знімання металу в одиницю часу  $K$ . Експерименти проводилися на плоскошліфувальному верстаті моделі ЗГ71М. Зразки зі сталі

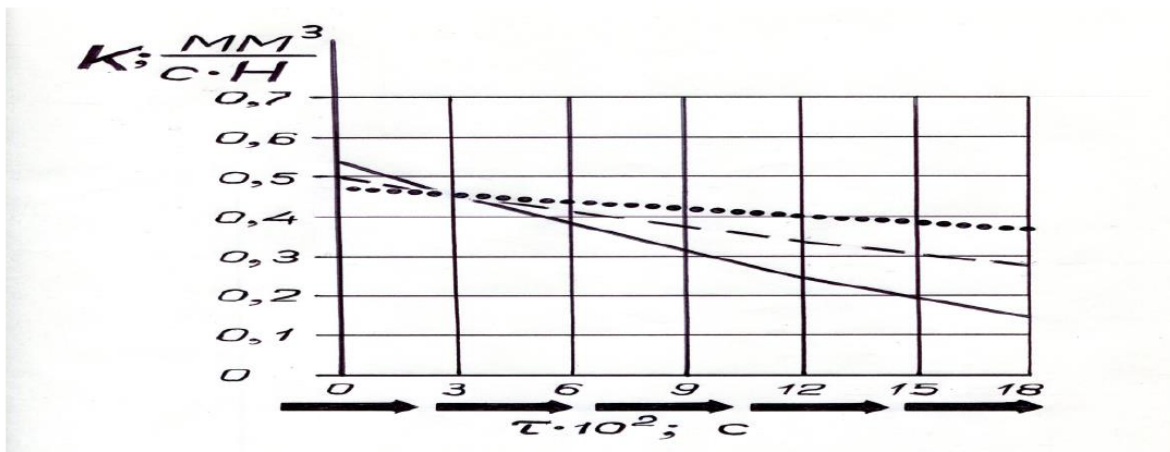


У10 шліфували суцільним, переривчастим ( $n = 12$ ,  $N = 0,6$ ) і переривчастим імпрегнованим колами ПП 250□20□76 24А 25СМ2 6К5 за пружною схемою (без поперечної подачі). До складу імпрегнатора входили стеаринова кислота (60%), олеїнова кислота (20%), ацетамід (20%).



**Рис.4.** Просторові графіки залежностей параметрів  $L$  і  $|L| > \frac{M+1}{2}$  від числа ріжучих виступів на абразивному колі і величини ставлення ширини западини до довжини виступу: зліва - для «сухого» шліфувня; праворуч - для шліфування із застосуванням твердого змащення.

З рис.5 видно, що в початковий період часу ( $0 \leq \tau \leq 3$ ) питомий з'йом металу був приблизно однаковим для трьох досліджуваних процесів, а після 18-хвилинного періоду шліфування ріжуча здатність суцільного круга стала в два рази нижче в порівнянні з переривчастим імпрегнованим кругом. Зниження ріжучої здатності суцільного кола супроводжується підвищенням теплонапряженности процесу шліфування і, як наслідок, формуванням на обробленій поверхні великих внутрішніх залишкових напружень.



**Рис. 5.** Порівняльна оцінка ріжучої здатності суцільного (неперервна лінія), переривчастого (штрихова лінія) і переривчастого імпрегнованого (точкова лінія) кіл в часі.

**Висновки.** Запропоновано методику розрахунку внутрішніх залишкових напружень, виникаючих при зубошліфуванні коліс з цементуємих сталей. На основі виконаних розрахунків і експериментів запропоновані і обгрунтовані шляхи підвищення якості виготовлення робочих поверхонь зубчастих передач, що застосовуються в агрегатах теплових і атомних електростанціях.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Корчак, С.Н. Теория обрабатываемости сталей и сплавов при абразивной обработке /С.Н. Корчак //Вестник южно-уральского гос. ун-та.: Сб. науч. трудов (Серия «Машиностроение»). – 2003. –№9. Вып.4. – С.82 – 90.
2. Лебедев, В.Г. Механизм образования прижогов при шлифовании деталей из закаленных сталей /В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко, С.А. Аль-Аджелам //Наукові нотатки: Міжвузів. зб. (за напрямком «Інженерна механіка») – Луцк: ЛДТУ, 2013. Вип. 40. – С. 141 – 144.
3. Лебедев, В.Г. Фазово-структурные превращения при шлифовании стальных деталей, поверхностный слой которых упрочнен закалкой /В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко, С.А. Аль-Аджелам //Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Сб. мат. Междунар. науч.-техн. конф. – Київ: АТМ України, 2011. – С.130 – 133.
4. Мельникова, Е.П. Влияние технологических факторов финишной абразивной обработки на качество поверхности /Е.П. Мельникова //Технология машиностроения. – 2003. –№3. – С.13 – 16.
5. Усов, А.В. Современное состояние исследований термомеханических процессов при шлифовании /А.В. Усов, Э. Донеv //Труды Одесск. лолитехн. ун-та: науч. и призыв.-практ. сб. – Одесса: ОНПУ, 2001. – Вып.5. –С.22 – 27.
6. Усов, А.В. Моделирование тепловых процессов при обработке конических заготовок/А.В. Усов, В.Д. Иоргачев, Н.Д. Кравченко //Труды Одесск. лолитехн. ун-та: науч. и призыв.-практ. сб. – Одесса: ОНПУ, 2001. – Вып.5. –С.28 – 31.
7. Генкин, М.Д. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач /М.Д. Генкин, М.А. Рыжов, Н.М. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 232с.

8. Сатарадзе, В.С. Повышение надежности цементуемых деталей /В.С. Сатарадзе. – М.: Машиностроение, 1975. – 216с.

9. Редько, С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов /Саратов: Издательство Саратовского университета, 1986. – 231с.

10. Бахвалов, В.А. Исследование влияния параметров процесса зубошлифования конусным кругом и исходного состояния материала на качество поверхностного слоя: дис. ... канд. техн. наук.: 05.02.08. /– Одесса, 1977. – 350с.

11. Якимов, А.А. Тепловые процессы при зубошлифовании и влияние их на долговечность зубчатых колес /А.А. Якимов, П.А. Якимов. //Оборудование и инструмент для профессионалов (серия - металлообработка): Междунар. информ.-техн. журнал. - №1(144). – 2012. – С. 68 – 70.

12. Якімов, О.О. Мастило для механічної обробки металів /О.О. Якімов, В.І. Віннікова /Патент 9586 Україна, С10М133/56; №93111448; Заявл. 31.12.92; Опубл. 26.02.99. Бюл.№1 – 4с.

13. Якимов, А.А. Особенности прерывистого шлифования /А.А. Якимов, Л.В. Бовнегра //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Міжнарод. науко.-техн.журнал. - №1. – 2016. – С.179 – 187.

14. Якімов, О.О. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару зубів високоточних зубчатих коліс при шліфуванні: дис. ... докт. Техн.. наук.: 05.02.08.– Одеса, 2015. – 465с.

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ В ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИИ**

Якімов О., Уминський С., Кліменк Н., Бовнегра Л., Шихирева Ю.

*Развитие современного энергомашиностроения идет по линии непрерывного повышения скоростей, коэффициента полезного действия и мощности агрегатов. Зубчатые передачи и редукторы являются ответственными частями современных механизмов и занимают важное место в отечественном энергомашиностроении. Прочность и износостойкость зубчатых передач, помимо конструктивных факторов, в большой степени зависит и от технологических приемов обработки. Заключительным этапом изготовления таких колес является операция зубошлифования. В процессе зубошлифования в тонком поверхностном слое происходят сложные и своеобразные термомеханические процессы. В результате кратковременного нагрева до высоких температур в таком поверхностном слое возникают структурные превращения, называемые прижогами, а в некоторых случаях даже микро и макротрещины. Кроме того, имеют случаи изготовления зубчатых колес со скрытыми дефектами шлифования (например, появление в поверхностном слое зубьев больших растягивающих напряжений), что снижает ресурс работы, а в отдельных случаях вызывает поломку зубьев в условиях эксплуатации. Разработка эффективных мер по обеспечению качества поверхностного слоя на операции зубошлифования во многом зависит от возможности прогнозирования (или расчета) температур и остаточных напряжений по глубине цементованного слоя зубьев. Предложена методика*

*расчета внутренних остаточных напряжений, возникающих при зубошлифовании колес из цементуемых сталей. На основании выполненных расчетов и экспериментов предложены и обоснованы пути повышения качества изготовления рабочих поверхностей зубчатых передач, применяемых в агрегатах тепловых и атомных электростанциях.*

**Ключевые слова:** *цементированный слой, остаточные напряжения, твердая смазка, прерывистый круг.*

## **ENSURING THE QUALITY OF MANUFACTURING GEAR TRANSMISSIONS IN POWER MECHANICAL ENGINEERING**

Yakimov O., Uminsky S., Klimenko N., Bovnegra L., Shikhireva Yu.

*The development of modern power engineering goes along the line of continuous increase of speeds, efficiency and power units. Gears and gearboxes are crucial parts of modern mechanisms and occupy an important place in the domestic power engineering industry. The strength and durability of gears, in addition to design factors, to a large extent depends on the processing techniques. The final stage of manufacturing such wheels is the gear grinding operation. In the process of tooth-grinding, complex and unique thermomechanical processes take place in the thin surface layer. As a result of short-term heating to high temperatures, structural transformations, called prizhogami, occur in such a surface layer, and in some cases even micro and macro-cracks. In addition, there are cases of manufacturing gears with hidden grinding defects (for example, the appearance in the surface layer of teeth of large tensile stresses), which reduces the service life, and in some cases causes the teeth to break under operating conditions. The development of effective measures to ensure the quality of the surface layer during a gear grinding operation largely depends on the ability to predict (or calculate) temperatures and residual stresses along the depth of the cemented tooth layer. A method for calculating the internal residual stresses arising during gear grinding of wheels from cemented steels is proposed. On the basis of the performed calculations and experiments, the ways of improving the quality of manufacturing the working surfaces of gears used in units of thermal and nuclear power plants are proposed and substantiated.*

**Key words:** *cemented layer, residual stresses, solid lubrication, intermittent circle.*