

УДК 621.791

С.А.Аль Аджейлат¹, В. Г.Лебедев, А.В.Усов²¹Одеський автодорожній коледж Одеського національного політехнічного університету²Одеський національний політехнічний університет**АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ КРУГАМИ З КНБ**

Розглядаються питання аналітичного визначення динамічних і термодинамічних явища при шліфуванні загартованих сталей колами із КНБ. Розглядаються закономірності формування якісних характеристик поверхневого шару – залишкових напруг і тріщин.

Ключові слова: шліфування, загартована сталь, термодинамічні явища

Показники якості деталі в значній мірі формуються в процесі обробки, зокрема остаточно формуються при шліфуванні. Під час процесу шліфування поверхня деталі зазнає динамічному впливу ріжучих зерен, а також температурному впливу, що забезпечує формування таких найважливіших характеристик поверхневого шару деталі як залишкові напруги, а також наявність або відсутність тріщин. Ці відомості звичайно одержують у результаті експериментальних досліджень, які, при всій їхній цінності, важко піддаються узагальненню.

Ціль дослідження – аналітично дослідити процес шліфування й виявити узагальнені закономірності формування якісних характеристик поверхневого шару, які були б застосовні для будь-яких матеріалів, що шліфуються.

Дослідження:

1. Визначення сумарних сил різання

У будь-який даний момент часу знімання металу при шліфуванні здійснюється декількома зернами, які перебувають у межах плями контакту круга з деталлю.

Отже, сили різання при шліфуванні є миттєвою сумою сил, що виникають при різанні зернами, що перебувають у межах довжини дуги контакту круга з деталлю.

Необхідно відзначити, що величина стружки, що знімається кожним зерном або поглиблення кожного зерна в метал, є величинами відмінними друг від друга, оскільки в межах плями контакту кола з деталлю є зерна, які вже виходять із контакту й, отже, знімають максимальну стружку й зерна які тільки входять у контакт і взагалі в цей момент не знімають стружки, а тільки труться.

Для спрощення завдання можна вважати, що в цей момент часу всі зерна в межах плями контакту знімають якусь однакову усереднену стружку.

Якщо використовувати залежності, викладені в роботах [2,3,4], то можна записати.

$$P_{z\Sigma} = \sum_1^n P_{z_3} = \sum_1^n \frac{2B}{v_{кр}} \cdot \sqrt{\tau}, \quad (1)$$

де $P_{z\Sigma}$ – сумарна сила різання, В – коефіцієнт враховуючий міцність матеріалу й швидкість деформації [Редько, Екобори]; n – число зерен у межах плями контакту кола з деталлю; P_{z_3} – сила різання одного зерна; $v_{кр}$ – швидкість кола, м/с.

Як показано в роботах [1, 2, 3] у різанні беруть участь порядку 11 % зерен з тих, що перебувають на поверхні кола. Обробляючи дані цих робіт, автори склали таблицю (табл. 1) і графік (рис 1), які показують питома число ріжучих зерен в одиниці поверхні кола.

Використовуючи ці дані легко можна визначити число одночасне працюючих зерен у плямі контакту кола з деталлю.

Дійсно, площа плями контакту буде

$$F = \sqrt{D \cdot t} \cdot S, \quad (2)$$

де F – площа плями контакту кола з деталлю; D – діаметр кола; t – глибина шліфування; S – поперечна подача – мм/хід або мм/про.

Таким чином, сумарна сила $P_{z\Sigma}$, буде:

$$P_{z\Sigma} = \sum_1^n P_{z_3} \cdot \sqrt{D \cdot t} \cdot S \cdot Z = \frac{2B}{v_{кр}} \sqrt{\tau} \cdot \sqrt{D \cdot t} \cdot S \cdot Z. \quad (3)$$

Таблиця 1.

Відстань між ріжучими зернами в КНБ колі l_ϕ (м) і питоме число ріжучих зерен Z (шт/м²)

Структура №	$\frac{l_\phi}{Z}$	Зернистість					
		630/500	400/250	250/160	160/100	125/100	80/63
4	$l_\phi \cdot 10^{-3}$, м	4,07	3,19	2,27	2,03	1,81	1,293
	Z , шт/м ²	42971	72795	134108	239564	553260	589872
5	$l_\phi \cdot 10^{-3}$, м	4,28	3,33	2,3	2,05	1,82	1,317
	Z , шт/м ²	41399	70132	129202	230801	335474	568300
6	$l_\phi \cdot 10^{-3}$, м	4,32	3,36	2,34	2,08	1,85	1,338
	Z , шт/м ²	40158	68029	125328	223880	325413	551257
7	$l_\phi \cdot 10^{-3}$, м	4,36	3,41	2,37	2,11	1,88	1,355
	Z , шт/м ²	39137	66300	122143	218190	317143	537248
8	$l_\phi \cdot 10^{-3}$, м	4,42	3,43	2,42	2,17	1,94	1,37
	Z , шт/м ²	38274	64838	119449	213378	310149	525400

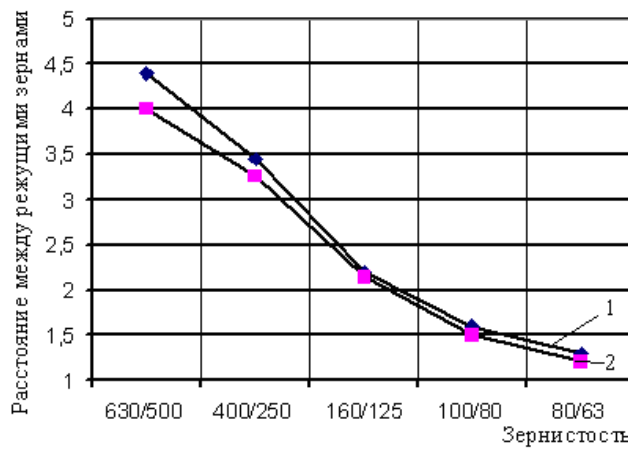


Рис. 1. Відстань між ріжучими зернами в колі із КНБ залежно від зернистості: 1 – структура 6, 2 – структура 5

Розрахунки, проведені по данім вираженню для зернистостей 400/250; 250/160; 160/100, показані на рис.2.

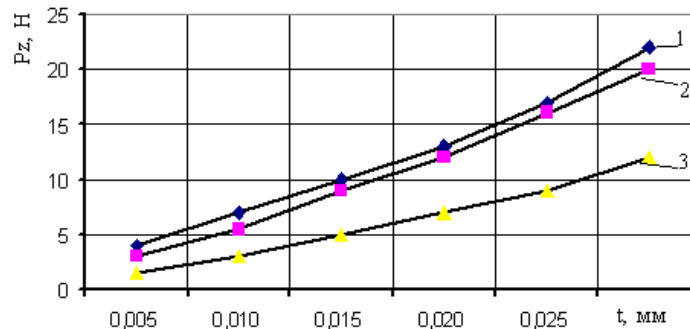


Рис. 2. Аналітичні залежності значень сумарних сил різання P_z від глибини різання при різних зернистостях. Структура № 6:1— 250/160; 2 — 160/100; 3 — 400/250

Як видно з малюнка, при зернистості 250/160 сили різання трохи вище, чим при зернистості 160/100. Трохи несподіване зниження сил при зернистості 400/250. Це можна пояснити тим, що в цьому випадку різко падає число працюючих зерен у плямі контакту кола з деталлю. Тому, незважаючи на те, що сила різання від кожного зерна підвищується, сумарна сила виявляється нижче.

Аналізуючи наведені математичні залежності можна затверджувати, що при збільшенні швидкості різання сумарні сили зменшуються, а при збільшенні швидкості деталі сили зростають. Збільшення подачі на хід або на оберт, приводить до збільшення сил різання.

2. Визначення контактної температури шліфування

Відомо, що в результаті процесу стружкоутворення затрачається значна потужність, яка перетворюється в тепло. У результаті утворюється потужне теплове джерело, яке нагріває поверхню з надзвичайно високою швидкістю. Після чого впливає швидке охолодження із ще більшою швидкістю, що може привести до появи тріщин.

Потужність теплового джерела (Вт) визначається вираженням:

$$q = P_z \cdot v_{кр} \quad (4)$$

де P_z – тангенціальна складова сили різання (сила стружкоутворення), Н;

Розподіл тепла між колом достатнім ступенем, що й шліфується деталлю з, точності можна визначити, використовуючи дані роботи [5]:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (5)$$

де q_1 – інтенсивність теплового потоку перехідна в коло; q_2 – інтенсивність теплового потоку перехідна в деталь; ε_1 – коефіцієнт теплової активності кола, $\varepsilon_1 = \sqrt{\lambda_1 \cdot c_1 \cdot \gamma_1}$; ε_2 – коефіцієнт теплової активності деталі, $\varepsilon_2 = \sqrt{\lambda_2 \cdot c_2 \cdot \gamma_2}$; де λ – коефіцієнт теплопровідності, Дж/(м·с·град); γ – щільність матеріалу, кг/м³; c – теплоємність, Дж/(кг·град).

Для визначення температури й температурного поля, що виникає при шліфуванні, скористаємося наступними міркуваннями.

Контактна температура шліфування це як би загальне температурне тло по плямі контакту, на яким є температурні спалахи від ріжучих зерен (мал. 3).

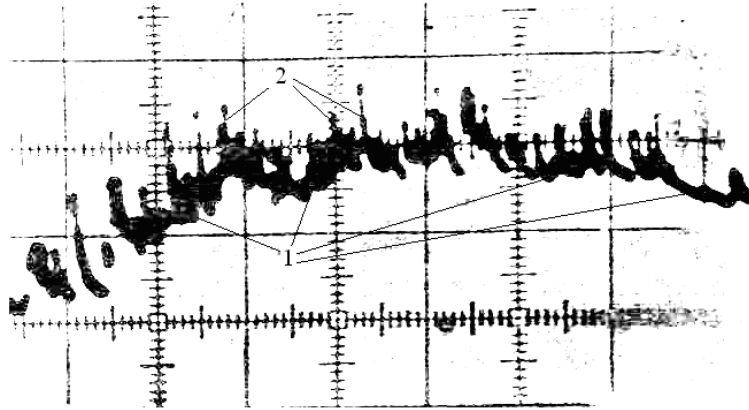


Рис.3. Характерна осцилограма температури шліфування.

1 – загальне температурне тло; 2 – температурний спалаху від ріжучих зерен

Отже, при аналітичній дослідженні, диференціальне рівняння теплопровідності необхідно вирішувати з урахуванням цих обставин. Вирішуючи це рівняння при граничних умовах другого роду, маємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - v_o \frac{\partial \theta}{\partial x} &= a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right); \\ \frac{\partial \theta}{\partial y} &= -\frac{c\sqrt{\tau}}{\lambda} [H(x) - H(x-L)] - \delta(x + k \cdot l_\phi - v_\kappa \cdot \tau) + \\ &+ \frac{\theta}{2v_o} \frac{\sqrt{\tau}}{\sqrt{\tau'}} [H(x) - H(x-l_\phi)] - \theta_{ост} \end{aligned} \quad (6)$$

Побудувавши згортку Гріна, і виконавши перетворення, одержимо:

$$\theta(x, y, z) = \frac{c\sqrt{a}}{\lambda\sqrt{\pi}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_a^{\tau} \frac{e^{-\frac{v_{\delta}^2(\tau-\tau')}{4a}}}{\sqrt{\tau-\tau'}} d\tau' \int_0^L e^{-\frac{v_{\delta}(x+k\cdot l_{\phi}-v_{\kappa}\cdot\tau')}{2a} - \frac{(x+k\cdot l_{\phi}-v_{\kappa}\cdot\tau')^2+y^2}{4a(\tau-\tau')}} dx' -$$

$$- \frac{\theta \cdot c\sqrt{a}}{2v_{\delta} \cdot \lambda\sqrt{\pi}} \int_0^{\tau} \frac{\sqrt{\tau_3} e^{-\frac{v_{\delta}(\tau-\tau')}{4a}}}{\tau\sqrt{\tau(\tau-\tau')}} d\tau' \int_0^{l_{\phi}} e^{-\frac{v_{\delta}(x-x')}{2a} - \frac{(x-x')^2}{4a(\tau-\tau')}} dx', \quad (7)$$

де H — одинична функція Хевисайда; δ — імпульсна функція.

По виразу (7) розраховані значення температури шліфування за час контакту кола з певною крапкою поверхні. Вид теплового імпульсу показаний на мал.4.

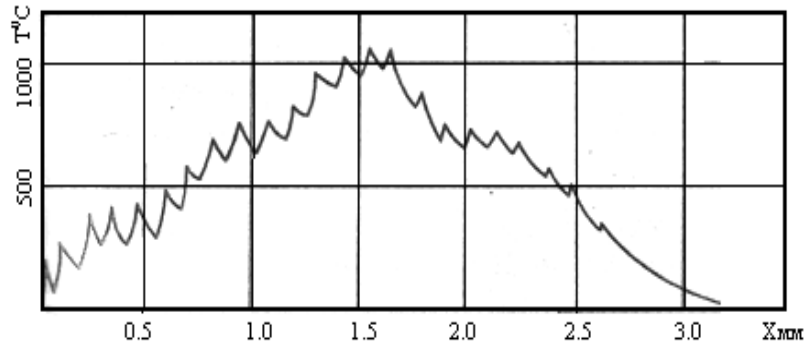


Рис.4. Тепловий імпульс, розрахований по вираженню (7), у межах довжини дуги контакту кола з деталлю

Оскільки контактна температура впливає на метал, те можна застосувати деяке згладжування імпульсів. У цьому випадку вираження для визначення температури значно спрощується.

Дійсно, виберемо систему координат X, Y, Z на поверхні напівнескінченного тіла. Умовимося, що тепло підводить до деякої області прямокутної форми $-a \leq x \leq a; -b \leq y \leq b$. Поза цією областю тепловий потік через поверхню деталі вважаємо рівним 0. Джерело тепла вважаємо нерухливим, а поверхню деталі, що рухається в напрямку убавання X зі швидкістю v_{δ} .

Розглянемо випадок, коли тепловий режим, що встановився, тобто коли $\tau \rightarrow \infty$.

Для елементарного майданчика $D=dx dy$ із центром у крапці X, Y розподіл температур буде:

$$\theta(x, y, z) = \frac{q(x)}{2\pi\lambda} \cdot \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{v_{\delta}r + v_{\delta}(x_0 - x)}{2a}\right),$$

$$R = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + z^2}. \quad (8)$$

Інтегруючи вираження (8) по області D , одержуємо:

$$\theta(x, y, z) = \frac{1}{2\pi\lambda} \int_{-a}^a dx \int_{-b}^b dy \left\{ \frac{1}{R} q(x) \exp\left[-\frac{v_{\delta}r + v_{\delta}(x_0 - x)}{2a}\right] \right\}. \quad (9)$$

Вибравши центр полярної системи координат у центрі плями контакту, і усереднив значення потужності, можна вроздріб приблизно проінтегрувати вираз (9). У результаті одержуємо:

$$\theta_{кр} = \frac{0,174Q'}{\pi\lambda\sqrt[5]{S}} \left[b \ln \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{b} + a \ln \frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{a} \right], \quad (10)$$

$$2b = S \text{ і } 2a = L = \sqrt{Dt}$$

Значення температур, розрахованих по даних залежностях, наведені на мал. 5.

Основними факторами режимів, які приводять до збільшення температури, є глибина різання й швидкість обертання шліфувального кола. Швидкість переміщення деталі щодо кола впливає дуже мало, оскільки при збільшенні швидкості деталі збільшується перетин стружки, що знімається одним зерном, що приводить до збільшення теплового імпульсу від кожного зерна. Однак через скорочення часу контакту кола з даною крапкою деталі поверхня одержує значно

менше теплових імпульсів. У результаті ці два явища компенсують один одного, і температура поверхні змінюється мало.

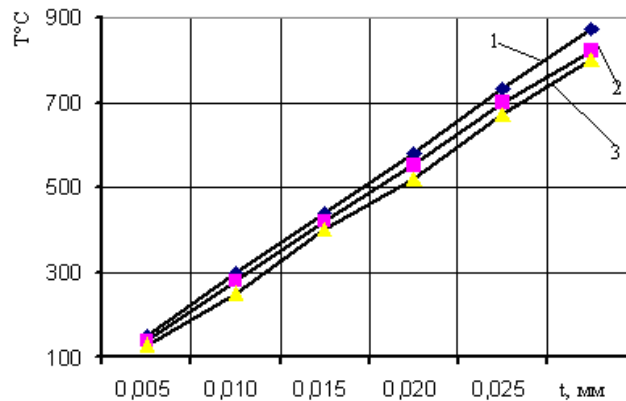


Рис. 5. Аналітичні залежності значень контактної температури шліфування від глибини різання при різних зернистостях. Структура № 6:
1 — 160/100; 2 — 250/160; 3 — 400/250

При збільшенні поперечної подачі росте площа плями контакту кола з деталлю й пропорційно росте число теплових імпульсів, які одержала поверхню. Т.е. тепловий потік збільшується, однак він поширюється по більшій площі, у результаті чого інтенсивність його (від якого залежить температура поверхні) не міняється, у результаті чого температура також не змінюється.

При збільшенні швидкості кола зменшується перетин стружки, який знімає кожне зерно, отже, знижується тепловий імпульс від кожного зерна. Однак при цьому, за час контакту кола з даною крапкою деталі поверхня одержує набагато більше теплових імпульсів. Збільшення числа теплових імпульсів є переважаючим чинником і сумарний тепловий потік зростає. Зміна швидкості кола можна використовувати, якщо немає особливих вимог до шорсткості поверхні. Як видно, при шліфуванні температура може досягати значних величин (до 1500 °C), отже, при шліфуванні мають місце більші перепади температури, що може приводити до утвору тріщин.

Розподіл тепла вглиб деталі розраховується по вираженню (11) і графічно презентовано на рис. 6.

$$T_y = T_{\text{нов}} \left[e^{-\frac{z^2}{4a\sqrt{Dt}}} + y \Phi \left(\frac{z}{2\sqrt{a\sqrt{Dt}}} \right) \right] \quad (11)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності $\lambda/\gamma c$ $\text{м}^2/\text{з}$

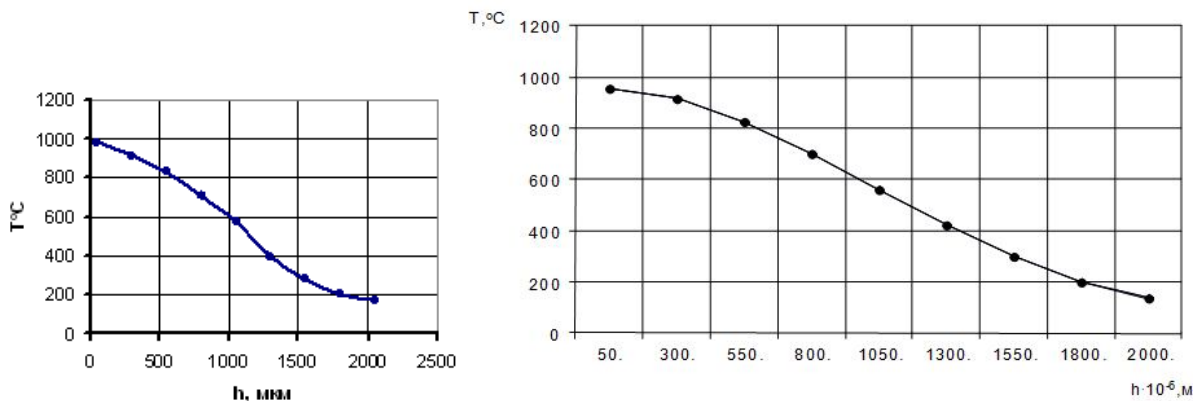


Рис 6. Графік зміни температури по глибині. Коло Л125/ 1000 ДО; Режими $v_k = 30$ м/с; $S = 10^{-3}$ м/хід; $t = 2 \cdot 10^{-5}$; $v_s = 0,166$ м/с)

3. Аналітична оцінка теплових залишкових напруг і ймовірність появи тріщин

Залишковими називаються напруги, які залишаються в деталі після припинення впливу на деталь зовнішніх сил або температур, тобто після неоднорідної пружно-пластичної деформації.

Коли шліфувальне коло виходить із контакту з поверхнею деталі, нагріті поверхневі шари деталі проохолоджуються й стискаються, тобто знову деформуються.

У процесі шліфування відбувається нагрівання й охолодження деталі, у результаті чого змінюються залишкові напруги, і виникає деформація деталей з покриттям.

Залишкові напруги виникають у результаті взаємодії пластично й упругодеформованих шарів. Якщо пластично-деформовані шари після охолодження прагнуть збільшити свою довжину в порівнянні з вихідної, то упругодеформовані шари прагнуть повернутися до вихідної довжини. Отже, одні шари будуть випробовувати напруги стиску, а інші – розтягання. Ці напруги залишаються в деталі й тому називаються залишковими.

Для визначення величини теплових залишкових напруг скористаємося вираженням з роботи (3). У результаті деяких перетворень одержимо формулу:

$$\sigma = \frac{\alpha E \left\{ T_{нов} \left[e^{-\frac{z^2}{4a\sqrt{Dt}} \frac{v}{v}} + yF \left(\frac{z}{2\sqrt{a\sqrt{Dt}} \frac{v}{v}} \right) \right] - 20 \right\}}{2(1-\mu)} \quad (12)$$

Залежність величини залишкової напруги від режимів шліфування показані на мал. 7.

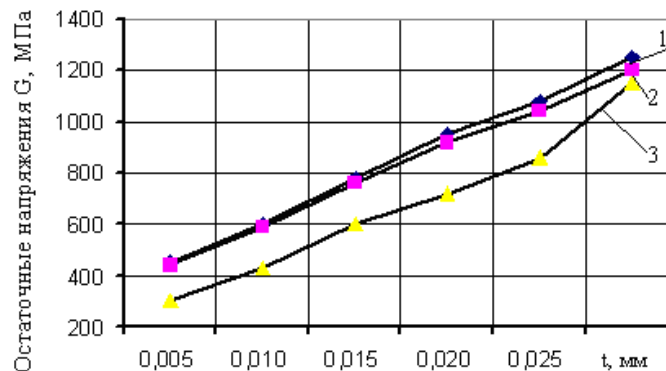


Рис. 7. Аналітичні залежності значень залишкових напруг від глибини різання при різних зернистостях. Структура № 6: 1 – 160/100; 2 – 250/160; 3 – 400/250

Як видно з отриманих даних, закономірності зміни залишкових напруг відповідають змінам температури шліфування. Ті фактори режимів різання, які приводять до росту температури шліфування, приводять до росту залишкових напруг.

Отримані дані свідчать, що виникаючі залишкові напруги можуть перевершувати межа міцності загартованого шару на розтягання, у результаті чого утворюються тріщини. Як видно безпечна межа шліфування перебуває в межах глибин 0,02 мм, що є вкрай низько продуктивним.

Глибину поширення тріщин можна розрахувати виходячи з наявного температурного градієнта.

Оскільки при шліфуванні прогрівається тільки поверхневий шар, те, як і слід було сподіватися, глибина тріщин не перевищує глибину проникнення теплового поля.

При шліфуванні із глибиною 0,01 мм залишкові напруги не перевершують межа міцності поверхневого шару, тому тріщин поверхневого шару не спостерігається. Однак при збільшенні глибини шліфування до 0,02 мм залишкові напруги можуть значно перевищити межа міцності поверхневого шару на розтягання, у результаті чого можуть з'явитися тріщини поверхневого шару глибиною 0,25 мм (мал. 8).

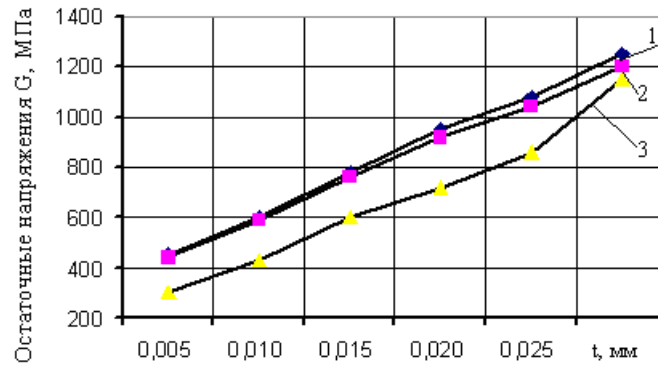


Рис. 8. Графік зміни залишкових напруг по глибині загартованого шару. Коло Л125/ 1000 ДО. Режими шліфування: $v_{кр} = 30$ м/с, $S = 10-3$ м/хід, $t = 2 \cdot 10^{-5}$ м, $v_3 = 0,166$ м/с:
1 – 160/100; 2 – 250/160; 3 – 400/250

4. Глибина фазово-структурних перетворень при шліфуванні

Для визначення глибини фазово-структурних перетворень можна скористатися даними роботи [5], де глибина фазово-структурних перетворень визначається виразом:

$$y = 2\sqrt{a\tau_{эф} \ln \frac{\theta_n}{\theta_{cn}}} = 2\sqrt{a\tau \frac{\theta_n - \theta_{cn}}{\theta_{cn}} \ln \frac{\theta_n + \theta_{cn}}{2\theta_{cn}}}, \quad (13)$$

де $\tau_{эф} = \tau \frac{\theta_n - \theta_{cn}}{\theta_n}$ – ефективний час теплового впливу на дану крапку поверхні; τ – час впливу

теплового імпульсу на дану крапку поверхні, θ_{cn} – температура, при якій починаються фазові або структурні перетворення (ФСП), θ_n – температура поверхні.

Під ефективним часом теплового впливу розуміється час, протягом якого на дану крапку поверхні діяла температура, рівна або вище температури θ_{cn} , (мал. 9). Час це можна визначити безпосередньо з теплового імпульсу, скориставшись подобою трикутників АВС і ДВІ.

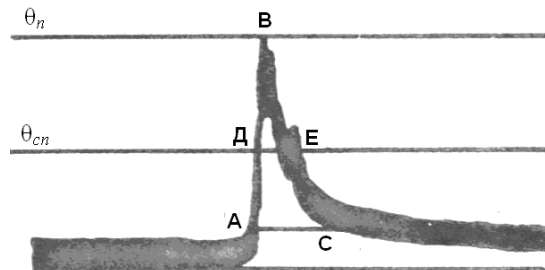


Рис. 9. Вид теплового імпульсу, зареєстрованого на малій швидкості розгорнення

Ефективний час теплового впливу температури θ_{cn} , що перевищує температури, при якій відбуваються фазові й структурні перетворення, трохи менше, чим загальний час теплового впливу температури на дану крапку. Значення температури поверхні θ_n , що діє за час $\tau_{эф}$, ухвалюється по мал.9.

$$\theta_n = \theta_{cn} + \frac{\theta_n - \theta_{cn}}{2} \quad (14)$$

Оцінка глибини проникнення теплового поля з температурою, відповідній до температури структурних перетворень, показує, що при різній комбінації температур і часу контакту даної крапки металу з колом глибина проникнення теплового поля буде різною. Різні режими, що допускаються при обробці, забезпечують, з одного боку, різні температури, а з іншого сторони, різний час дії цих температур, що відбивається на характері й глибині структурних перетворень.

Висновки

1. Величина сумарних сил різання P_z може доходити до 20 Н, що при швидкості обертання кола 30 м/с відповідає потужності порядку 600 Вт і середньої інтенсивності теплового потоку 108 Вт/м².

2. Температура поверхні, що шліфується, при глибині шліфування до 0,03 мм може становити ⁸⁰⁰⁻⁹⁰⁰ос, що перевищує температуру А_{с3} сталей, що шліфуються.

3. Отримані вираження для оцінки величини залишкових напруг по глибині прошліфованого шару й для оцінки глибини поширення можливих фазово-структурних змін поверхневого шару дають можливість вибирати безпечні режими обробки, що зменшує ризик утвору шліфовочних тріщин.

1. Шумячер В.М. Міцність абразивного зерна при шліфуванні / В.М. Шумячер, О.І. Пушкарев // Технологія машинобудування. — 2006. — №7. — С. 26-27.
2. Коротков В.А. Зношування шліфувальних зерен з різною формою / Коротков В.А. // Обробка металів. — 2007. — №1. — С. 30 – 32.
3. Лебедев В.Г. Фактична відстань між ріжучими зернами й питоме число ріжучих зерен в одиниці поверхні зльборового кола / В. М. Лебедев, Чумаченко Т.В. // Одеса, Проблеми техніки. НауковорВиробничий журнал. — 2009, — №3. — С. 128 – 136.
4. Лебедев В.Г., Аль Аджейлат С.А. Радіуси закруглення зерен із КНБ і середня величина стружки, що знімається ріжучим зерном / В. М. Лебедев, С.А. Аль Аджейлат // Одеса, Проблеми техніки. НауковорВиробничий журнал. — 2009. — №4. — С.76 – 85.
5. Лебедев В.Г. Підвищення якісних характеристик загартованих зубчастих коліс технологічними методами : автореф. дис. на змагання . ступені канд. техн. наук : спец. 05.02.08 „Технологія машинобудування” / В. М. Лебедев. — Одеса, 1968. — 20 с.