

І.В. Бельмас, д.т.н., проф.
О.І. Білоус, к.т.н., доц.
Г.І. Танцура, к.т.н., доц.
С.І. Чухно, к.т.н., доц.
Т.О. Танцура, аспірант

Дніпровський державний технічний університет

Вплив температурного розширення абразивного зерна на напружений стан інструменту

Мета роботи полягає в розробці моделі та методу визначення напружено-деформованого стану інструменту абразивної обробки матеріалів як ортотропного композита з довільною кількістю регулярно розташованих дискретних зерен, з'єднаних матеріалом зв'язки за умови теплового збільшення розміру довільного зерна робочої поверхні. В роботі встановлено, що екстремальні напруження зсуву матеріалу зв'язки в площині, нормальній до робочої поверхні інструменту, майже удвічі менші за відповідні напруження в площині, паралельній робочій поверхні інструменту. Теплове збільшення розмірів зерна, відповідно до принципу Сен-Венана, локально збурює напружено-деформований стан інструменту. Розмір зони локального збурення, викликаного тепловим розширенням зерна в напрямі розширення, залежить від механічних властивостей складових інструменту (модулів пружності на розтяг матеріалу зерен та на зсув матеріалу зв'язки). В усіх напрямках розміри зон збурень напружено-деформованого стану залежать від кількості зерен в інструменті в напрямках, що ортогональні напрямку теплової зміни розмірів зерна. Отримані результати надають можливість комплексного врахування композитної ортотропної побудови, механічних властивостей складових інструменту, в якому, за рахунок теплового розширення, збільшився розмір довільного зерна робочої поверхні. Лінійність постановки завдання дозволяє, шляхом складання результатів для змін розмірів окремих декількох довільно розташованих зерен, та за довільної температури нагрівання, визначати сумарний напружено-деформований стан. Отримані залежності, на стадії розробки технології обробки, дозволяють кількісно оцінити рівень напружень в інструменті, прогнозувати ймовірну кількість циклів навантаження до руйнування, впливати на значення напружень шляхом добору матеріалів на стадії виготовлення інструменту, обирати режими різання на стадії розробки технології, чим підвищити ефективність використання інструменту абразивної обробки.

Ключові слова: інструмент шліфування; зерно; зв'язка; теплове розширення; переміщення; сили; механічні властивості.

Актуальність теми. Інструмент абразивної обробки складається з абразивних зерен, що з'єднані матеріалом зв'язки. В процесі експлуатації інструменту окремі зерна робочої поверхні періодично взаємодіють з деталлю. Взаємодія зерен та деталі супроводжується виникненням сил взаємодії та тепловиділенням. Тепловиділення спричиняє нагрів окремих зерен та збільшенням їх розмірів. Зерна збільшених розмірів тиснуть на суміжні зерна. Значення сил тиску залежать від механічних властивостей складових абразивного інструменту та розташування зерен в ньому як в єдиній композитній системі.

Циклічність навантажень зерен, включно і зумовлених їх нагріванням, призводить до накопичення в інструменті мікроушкоджень. За досягнення межі витривалості руйнуються зерна, матеріал зв'язки. Руйнування зерен та випадання окремих зерен, внаслідок руйнування зв'язки, забезпечує оновлення різальної здатності зерен робочої поверхні інструменту. Встановлення механізму розподілу напружень в інструменті, зокрема тих, що виникли внаслідок зміни розмірів зерен, актуальна науково-технічна задача. Її розв'язання дозволить комплексно враховувати властивості, взаємне розташування та взаємодію складових інструменту як єдиної системи дискретних абразивних зерен, з'єднаних іншим неперервним матеріалом, – композитної конструкції, що обумовлена тепловиділенням у процесі експлуатації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Питанням взаємодії складових інструменту абразивної обробки присвячена значна кількість робіт. У роботі [1] зроблено аналіз методів дослідження процесу різання одиничним абразивним зерном. Встановлено, що на процес різання впливають форма та кут орієнтації зерна відносно деталі, а комп'ютерне моделювання процесів різання – перспективний метод дослідження. Вплив зміни форми інструменту абразивної обробки, температурно-силових факторів розглянуто в статті [2]. В [3] встановлено що радіус кромки впливає на значення коефіцієнта тертя в парі деталь – інструмент на значення сили різання. Про залежність коефіцієнта тертя вказано і в [4]. Автори [5] вважають, що абразивне зношування – основна форма зношування інструменту

абразивної обробки, а ступінь зношування абразиву можна оцінювати кривизною різальної частини [6]. В [7] експериментальним шляхом досліджено особливості процесу шліфування циліндричних поверхонь валів периферією орієнтованого круга в режимі затуплення, а в [8] – силові чинники процесу без центрального шліфування. В [9] визначено умови зменшення температури під час переривчастого шліфування та підвищення продуктивності за обмеження температури шліфування. В дослідженні [10] уточнено алгоритм розрахунку температури під час механічної обробки. В [11] розглянуто передумови (теоретичні та технологічні) самозаточування алмазних кругів. Звернуто увагу, що в літературі немає єдиного розуміння механізму самозаточування. Означена відсутність ускладнює розробку методів впливу на такий механізм. У [12] наведено відомі розрахункові схеми, методи розрахунку параметрів силової взаємодії елементів системи «абразивне зерно – зв'язка», а в [13] показано можливість підвищення стійкості за рахунок управління залишковими напруженнями в інструментальному композиті. В [14] наведено метод розрахунку складових сили різання на передній поверхні абразивного зерна. Спрощений алгоритм розрахунку температури різання запропоновано в публікації [15]. У [16] наведено основні чинники, які впливають на температуру в процесі обробки. Надано рекомендації стосовно раціональних режимів обробки за мінімуму миттєвих температур.

Аналіз відомих робіт показав, що напружено-деформований стан (НДС) інструменту як композита дискретних зерен, з'єднаних неперервним матеріалом, викликаний зміною розмірів одного зерна не досліджено на достатньому рівні для визначення напружень, що виникають в інструменті.

Метою статті є встановлення впливу теплового розширення зерна інструменту абразивної обробки на його напружено-деформований стан та отримання аналітичних залежностей для визначення кількісних показників такого стану

Викладення основного матеріалу. В цілому за значної кількості зерен дещо відмінних розмірів в інструменті вони розподілені та з'єднані матеріалом зв'язки випадково. Разом з тим вдосконалення технологій виготовлення абразивних інструментів спрямоване на мінімізацію відмінності розмірів зерен зокрема алмазних та впорядкування їх взаємного розташування. Розглянемо інструмент як композитний ортотропний – з упорядкованим розташуванням зерен у трьох ортогональних напрямках, з'єднаних неперервним матеріалом, з відмінними від зерен механічними властивостями.

Прийемо, що абразивний інструмент має форму паралелограма. Абразивні зерна – форму куба з ребрами, розмір яких – b . Зерна розташовані рядами, шарами та в рядах – в системі безрозмірних координат номерів ($1 \leq \Delta \leq K$, $1 \leq i \leq M$, $1 \leq j \leq N$). Теплове розширення зерна змінює відстані між центрами суміжних з ним зерен робочого шару ($\Delta = 1$) в двох напрямках. Закономірності змін подібні. Визначимо лише вплив зміни розміру на величину ε в напрямі j зерна з дискретними координатами $i = I$, $j = J$, $\Delta = 1$. Умова рівноваги обраного зерна відмінна від умов рівноваги інших. Врахуємо це, умовно розріжемо інструмент площиною, паралельною площині i , Δ та такою, що проходить крізь центр маси зерна збільшених розмірів J . Отриманим частинам інструменту надамо номери один та два. Номери внесемо до індексів коефіцієнтів величин, що стосуються конкретних частин. У [17], на основі рівноваги окремого зерна, сформульовано вирази переміщень та сил взаємодії зерен у напрямку, нормальному до робочої поверхні інструменту. За аналогією переміщення та сили взаємодії зерен у напрямку осі j від теплового розширення одного зерна робочої поверхні мають вигляд:

$$u_{\varepsilon,\Delta,i,j} = \frac{1}{EF} \left(\frac{\sum_{k=1}^{K-1} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{A_{\varepsilon,m,k} e^{\varkappa_{m,k} J} + B_{\varepsilon,m,k} e^{-\varkappa_{m,k} J}}{\varkappa_{m,k}} c(\mu_m, I) c(\beta_k, \Delta) + \sum_{m=1}^{M-1} \frac{A_{\varepsilon,m}^M e^{\varkappa_m^M J} + B_{\varepsilon,m}^M e^{-\varkappa_m^M J}}{\varkappa_m^M} c(\mu_m, I) + \sum_{k=1}^{K-1} \frac{A_{\varepsilon,k}^K e^{\varkappa_{\varepsilon,k}^K J} + B_{\varepsilon,k}^K e^{-\varkappa_{\varepsilon,k}^K J}}{\varkappa_{\varepsilon,k}^K} c(\beta_k, \Delta) \right), \quad (1)$$

$$T_{\varepsilon,\Delta,i,j} = \frac{1}{EF} \left(\sum_{k=1}^{K-1} \sum_{m=1}^{M-1} (A_{\varepsilon,m,k} e^{\varkappa_{m,k} J} - B_{\varepsilon,m,k} e^{-\varkappa_{m,k} J}) c(\mu_m, i) c(\beta_k, \Delta) + \sum_{m=1}^{M-1} (A_{\varepsilon,m}^M e^{\varkappa_m^M J} - e^{-\varkappa_m^M J}) c(\mu_m, I) + \sum_{k=1}^{K-1} (A_{\varepsilon,k}^K e^{\varkappa_{\varepsilon,k}^K J} - B_{\varepsilon,k}^K e^{-\varkappa_{\varepsilon,k}^K J}) c(\beta_k, \Delta) \right), \quad (2)$$

де $c(\mu_m, i) = \cos(\mu_m(i - 0,5))$; $\mu_m = \frac{\pi m}{M}$; $\beta_k = \frac{\pi k}{K}$; ε – номер частини; E, F – модуль пружності та площа перерізу зерна; $\varkappa_{k,m}, \varkappa_m^M, \varkappa_{\varepsilon,k}^K$ – характеристичні показники; h – відстань між зернами.

Характеристичні показники.

$$\varkappa_{k,m} = \operatorname{arch} \left(1 + \frac{Gb}{Eh} (\cos(\beta_k) + \cos(\mu_m) - 2) \right), \quad \varkappa_{\varepsilon,k}^K = \operatorname{arch} \left(1 + \frac{Gb}{Eh} (\cos(\beta_k) - 1) \right),$$

$$\varkappa_m^M = \operatorname{arch} \left(1 + \frac{Gb}{Eh} (\cos(\mu_m) - 1) \right).$$

Значимо, що грані інструменту, нормальні до напрямку осей дискретних координат i та Δ , вільні від зовнішнього впливу. Вказане забезпечене в (1) та (2) формою тригонометричних функцій. На інші грані не діють дотичні навантаження. Вказане можливе за додаткових умов:

$$u_{1,i,0,\Delta} = u_{1,i,N,\Delta} u_{2,i,N+1,\Delta} = u_{2,i,0,\Delta}. \quad (3)$$

Підставимо в умови (3) значення переміщень для обох поверхонь інструменту. Отримаємо:

$$A_{1,m,k} = -B_{1,m,k} \frac{1-e^{-\kappa_{m,k}}}{1-e^{\kappa_{m,k}}}, \quad A_{1,k}^K = -B_{1,k}^K \frac{1-e^{-\kappa_k^K}}{1-e^{\kappa_k^K}}, \quad A_{1,m}^M = -B_{1,m}^M \frac{1-e^{-\kappa_m^M}}{1-e^{\kappa_m^M}}, \quad (4)$$

$$A_{2,m,k} = -B_{2,m,k} \frac{e^{-\kappa_{m,k}(N+1)} - e^{-\kappa_{m,k}N}}{e^{\kappa_{m,k}(N+1)} - e^{\kappa_{m,k}N}}, \quad A_{2,m}^M = -B_{2,m}^M \frac{e^{-\kappa_m^M(N+1)} - e^{-\kappa_m^MN}}{e^{\kappa_m^M(N+1)} - e^{\kappa_m^MN}}, \quad A_{2,k}^K = -B_{2,k}^K \frac{e^{-\kappa_k^K(N+1)} - e^{-\kappa_k^KN}}{e^{\kappa_k^K(N+1)} - e^{\kappa_k^KN}}. \quad (5)$$

Скористаємося співвідношеннями (4), (5) переформулюємо (1) та (2) для кожної з частин інструменту

$$u_{1,\Delta,i,j} = \frac{1}{EF} \left(\begin{aligned} & \left(\sum_{k=1}^{K-1} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{B_{1,m,k}}{\kappa_{m,k}} \left(e^{-\kappa_{m,k}j} - \frac{1-e^{-\kappa_{m,k}}}{1-e^{\kappa_{m,k}}} e^{\kappa_{m,k}j} \right) c(\mu_m, i) c(\beta_k, \Delta) + \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^{M-1} \frac{B_{1,m}^M}{\kappa_m^M} \left(e^{-\kappa_m^M j} - \frac{1-e^{-\kappa_m^M}}{1-e^{\kappa_m^M}} e^{\kappa_m^M j} \right) c(\mu_m, I) + \right. \\ & \left. \sum_{k=1}^{K-1} \frac{B_{1,k}^K e^{-\kappa_k^K}}{\kappa_k^K} \left(e^{-\kappa_k^K j} - \frac{1-e^{-\kappa_k^K}}{1-e^{\kappa_k^K}} e^{\kappa_k^K j} \right) c(\beta_k, \Delta) \right) \end{aligned} \right), \quad (6)$$

$$T_{1,\Delta,i,j} = - \left(\begin{aligned} & \left(\sum_{k=1}^{K-1} \sum_{m=1}^{M-1} B_{1,m,k} \left(e^{-\kappa_{m,k}j} + \frac{1-e^{-\kappa_{m,k}}}{1-e^{\kappa_{m,k}}} e^{\kappa_{m,k}j} \right) c(\mu_m, i) c(\beta_k, \Delta) + \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^{M-1} B_{1,m}^M \left(e^{-\kappa_m^M j} + \frac{1-e^{-\kappa_m^M}}{1-e^{\kappa_m^M}} e^{\kappa_m^M j} \right) c(\mu_m, I) + \right. \\ & \left. \sum_{k=1}^{K-1} B_{1,k}^K \left(e^{-\kappa_k^K j} + \frac{1-e^{-\kappa_k^K}}{1-e^{\kappa_k^K}} e^{\kappa_k^K j} \right) c(\beta_k, \Delta) \right) \end{aligned} \right), \quad (7)$$

$$u_{2,\Delta,i,j} = \frac{1}{EF} \left(\begin{aligned} & \left(\sum_{k=1}^{K-1} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{B_{2,m,k}}{\kappa_{m,k}} \left(e^{-\kappa_{m,k}j} - \frac{e^{-\kappa_{m,k}(N+1)} - e^{-\kappa_{m,k}N}}{e^{\kappa_{m,k}(N+1)} - e^{\kappa_{m,k}N}} e^{\kappa_{m,k}j} \right) c(\mu_m, i) c(\beta_k, \Delta) + \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^{M-1} \frac{B_{2,m}^M}{\kappa_m^M} \left(e^{-\kappa_m^M j} - \frac{e^{-\kappa_m^M(N+1)} - e^{-\kappa_m^MN}}{e^{\kappa_m^M(N+1)} - e^{\kappa_m^MN}} e^{\kappa_m^M j} \right) c(\mu_m, I) + \right. \\ & \left. \sum_{k=1}^{K-1} \frac{B_{2,k}^K}{\kappa_k^K} \left(e^{-\kappa_k^K j} - \frac{e^{-\kappa_k^K(N+1)} - e^{-\kappa_k^KN}}{e^{\kappa_k^K(N+1)} - e^{\kappa_k^KN}} e^{\kappa_k^K j} \right) c(\beta_k, \Delta) \right) \end{aligned} \right), \quad (8)$$

$$T_{2,\Delta,i,j} = - \left(\begin{aligned} & \left(\sum_{k=1}^{K-1} \sum_{m=1}^{M-1} B_{2,m,k} \left(e^{-\kappa_{m,k}j} + \frac{e^{-\kappa_{m,k}(N+1)} - e^{-\kappa_{m,k}N}}{e^{\kappa_{m,k}(N+1)} - e^{\kappa_{m,k}N}} e^{\kappa_{m,k}j} \right) c(\mu_m, i) c(\beta_k, \Delta) + \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^{M-1} B_{2,m}^M \left(e^{-\kappa_m^M j} + \frac{e^{-\kappa_m^M(N+1)} - e^{-\kappa_m^MN}}{e^{\kappa_m^M(N+1)} - e^{\kappa_m^MN}} e^{\kappa_m^M j} \right) c(\mu_m, I) + \right. \\ & \left. \sum_{k=1}^{K-1} B_{2,k}^K \left(e^{-\kappa_k^K j} + \frac{e^{-\kappa_k^K(N+1)} - e^{-\kappa_k^KN}}{e^{\kappa_k^K(N+1)} - e^{\kappa_k^KN}} e^{\kappa_k^K j} \right) c(\beta_k, \Delta) \right) \end{aligned} \right). \quad (9)$$

Вище площиною в перерізі $j = J$ інструмент умовно поділено на дві частини. Такий поділ не впливає на значення сил. Значення сил стиску зерен робочих поверхонь обох частин, для яких $j = J$, дорівнюють одне одному. Відповідно:

$$T_{1,\Delta,i,J} = T_{2,\Delta,i,J}. \quad (10)$$

З умови рівності сил (10), з урахуванням (7) та (9), маємо такі співвідношення коефіцієнтів.

$$B_{1,m,k} = B_{2,m,k} \frac{e^{-\kappa_{m,k}J} + \frac{e^{-\kappa_{m,k}(N+1)} - e^{-\kappa_{m,k}N}}{e^{\kappa_{m,k}(N+1)} - e^{\kappa_{m,k}N}} e^{\kappa_{m,k}J}}{e^{-\kappa_{m,k}J} + \frac{1-e^{-\kappa_{m,k}}}{1-e^{\kappa_{m,k}}} e^{\kappa_{m,k}J}},$$

$$B_{1,m}^M = B_{2,m}^M \frac{e^{-\kappa_m^M J} + \frac{e^{-\kappa_m^M(N+1)} - e^{-\kappa_m^MN}}{e^{\kappa_m^M(N+1)} - e^{\kappa_m^MN}} e^{\kappa_m^M J}}{e^{-\kappa_m^M J} + \frac{1-e^{-\kappa_m^M}}{1-e^{\kappa_m^M}} e^{\kappa_m^M J}}, \quad (11)$$

$$B_{1,k}^K = B_{2,k}^K \frac{e^{-\kappa_k^K J} + \frac{e^{-\kappa_k^K(N+1)} - e^{-\kappa_k^KN}}{e^{\kappa_k^K(N+1)} - e^{\kappa_k^KN}} e^{\kappa_k^K J}}{e^{-\kappa_k^K J} + \frac{1-e^{-\kappa_k^K}}{1-e^{\kappa_k^K}} e^{\kappa_k^K J}}.$$

Теплове зростання розмірів зерна ($i = I, \Delta = 1, j = J$) впливає на взаємне розташування зерен суміжних частин. Цей вплив несиметричний. Поверхня інструменту, яка протилежна робочій, утворена зернами шару за номером K . Вона нерухома, тобто

$$u_{K,i,j} = 0. \quad (12)$$

Несиметричну задачу замінимо асиметричною. Умовно кількість шарів, розташованих вздовж осі координат Δ , змінимо з K на $2K - 1$. Умову переміщення зерен у напрямі осі j сформулюємо в такій формі – асиметричній.

$$u_{1,i,j,\Delta} = -u_{2,i,j,\Delta} = \varepsilon \begin{cases} 1(i = I \text{ and } \Delta = 1) \\ 0(i \neq I \text{ or } \Delta \neq 1) \\ -1(i = I \text{ and } \Delta = 2(K - 1)) \\ (i \neq I \text{ or } \Delta \neq 2(K - 1)) \end{cases}. \quad (13)$$

Збільшення кількості шарів з K до $2K - 1$ забезпечує виконання умови (12) та вимагає зміни значення вище визначеного коефіцієнта β_k на $\beta_k = \frac{\pi k}{2(K-1)}$ та збільшення кількості елементів складання у сформульованих вище виразах з $K - 1$ до $2(K - 1)$. Умову (13) задамо рядом Фур'є в дискретних, на обмежених кількістю зерен в структурі інструменту, безрозмірних координатах:

$$u_{2,i,j,\Delta} - u_{1,i,j,\Delta} = \frac{\varepsilon}{2M(K-1)} \left(2 \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{k=1}^{2(K-1)} (c(\beta_k, 1) - c(\beta_k, 2K)) c(\beta_k, \Delta) c(\mu_m, I) c(\mu_m, i) + \sum_{k=1}^{2(K-1)} (c(\beta_k, 1) - c(\beta_k, 2K)) c(\beta_k, \Delta) + \sum_{m=1}^{M-1} c(\mu_m, I) c(\mu_m, i) \right). \quad (14)$$

Врахуємо умови (10) та (14). Отримаємо значення невідомих коефіцієнтів для другої частини інструменту абразивної обробки. Знайдемо різницю переміщень зерен ділянок у перерізі $j = J$. Визначимо невідомі коефіцієнти.

$$B_{2,m,k} = \frac{2\varepsilon\varphi\beta_k(c(\beta_k,1)-c(\beta_k,2K))c(\mu_m,I)}{M(K-1)} \left(\begin{array}{c} \frac{e^{-\beta_k m(N+1)} - e^{-\beta_k mN}}{e^{\beta_k m(N+1)} - e^{\beta_k mN}} e^{\beta_k mJ} + e^{\beta_k mJ} \\ \frac{1 - e^{-\beta_k m}}{1 - e^{\beta_k m}} e^{\beta_k mJ} + e^{-\beta_k mJ} \\ \left(e^{-\beta_k mJ} - \frac{1 - e^{-\beta_k m}}{1 - e^{\beta_k m}} e^{\beta_k mJ} \right) - e^{-\beta_k mJ} + \\ + \frac{e^{-\beta_k m(N+1)} - e^{-\beta_k mN}}{e^{\beta_k m(N+1)} - e^{\beta_k mN}} e^{\beta_k mJ} \end{array} \right)^{-1},$$

$$B_{2,m}^M = \frac{\varepsilon\varphi\beta_m^M c(\mu_m, I)}{M(K-1)} \left(\begin{array}{c} \frac{e^{-\beta_m^M(N+1)} - e^{-\beta_m^M N}}{e^{\beta_m^M(N+1)} - e^{\beta_m^M N}} e^{\beta_m^M J} + e^{-\beta_m^M J} \\ \frac{1 - e^{-\beta_m^M}}{1 - e^{\beta_m^M}} e^{\beta_m^M J} + e^{-\beta_m^M J} \\ \left(e^{-\beta_m^M J} - \frac{1 - e^{-\beta_m^M}}{1 - e^{\beta_m^M}} e^{\beta_m^M J} \right) - e^{\beta_m^M J} + \\ + \frac{e^{-\beta_m^M(N+1)} - e^{-\beta_m^M N}}{e^{\beta_m^M(N+1)} - e^{\beta_m^M N}} e^{\beta_m^M J} \end{array} \right)^{-1},$$

$$B_{2,k}^K = \frac{\varepsilon\varphi\beta_k^K(c(\beta_k,1)-c(\beta_k,2K))}{M(K-1)} \left(\begin{array}{c} \frac{e^{-\beta_k^K(N+1)} - e^{-\beta_k^K N}}{e^{\beta_k^K(N+1)} - e^{\beta_k^K N}} e^{\beta_k^K J} + e^{-\beta_k^K J} \\ \frac{1 - e^{-\beta_k^K}}{1 - e^{\beta_k^K}} e^{\beta_k^K J} + e^{-\beta_k^K J} \\ \left(e^{-\beta_k^K J} - \frac{1 - e^{-\beta_k^K}}{1 - e^{\beta_k^K}} e^{\beta_k^K J} \right) - e^{\beta_k^K J} + \\ + \frac{e^{-\beta_k^K(N+1)} - e^{-\beta_k^K N}}{e^{\beta_k^K(N+1)} - e^{\beta_k^K N}} e^{\beta_k^K J} \end{array} \right)^{-1}.$$

Знайдені значення коефіцієнтів другої частини, разом з виразами співвідношень коефіцієнтів (11), дозволяють, за виразами (6–9), визначити переміщення та навантаження зерен, зумовлені зміною розміру робочого зерна в напрямі осі номерів j . Відомі переміщення зерен, відомі значення відстаней поміж зернами h та модуль зсуву матеріалу зв'язки G дозволяють визначити дотичні напруження в ньому. Знайдені переміщення, навантаження зерен та дотичні напруження в зв'язці визначають шуканий НДС інструменту абразивної обробки, зумовлений зростанням розміру робочого зерна в напрямі осі j .

Наведена методика дозволяє знайти подібний НДС інструменту від впливу збільшення розмірів робочого зерна з координатами $i = I, j = J, \Delta = 1$ внаслідок нагріву в напрямку осі i на величину ε . Шляхом складання отриманих показників НДС можна отримати шуканий напружено-деформований стан інструменту, зумовлений збільшенням розмірів довільного зерна робочої поверхні інструменту в площині, що паралельна робочій.

Скориставшись отриманими результатами, визначили величини, що характеризують напружено-деформований стан шліфувального інструменту, в якому абразивні зерна регулярно розташовані в шести шарах по п'ять рядів. Кожен з рядів складається з шести зерен. Третє зерно верхнього шару третього ряду, внаслідок нагрівання, змінило свій розмір на одиницю ($\varepsilon = 1$) в площині $j\Delta$. Зерна мають форму куба зі

стороною 0,1 мм. Товщина шару матеріалу зв'язки становить 0,01 мм. Модуль зсуву зв'язки $G = 10^9$ Па. Модуль пружності абразивного зерна $E = 10^{10}$ Па. Результати розрахунків наведені на рисунках 1–4

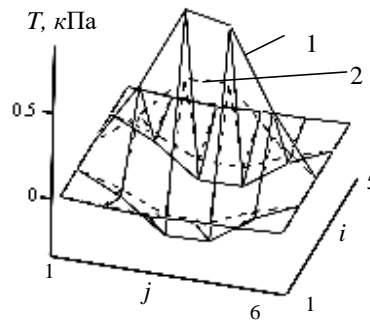


Рис. 1. Інтенсивності розподілу внутрішніх нормальних сил взаємодії зерен за номерами j , розташованими в рядах за номерами, що викликані тепловим зростанням розміру зерна в напрямку осі j (1 – в робочому шарі, 2 – під робочим шаром)

Відповідно до отриманих залежностей одностороннє збільшення розмірів зерна призводить до появи сил взаємодії зерен – сил стискання. Діють вони локально, що відповідає принципу Сен-Венана. Більші сили виникають поміж зернами, що розташовані в тому самому шарі, що і зерно збільшеного розміру. В суміжному шарі вони менші. Характери розподілів сил у шарах збігаються. Це показує, що напруження виникають не лише в зернах, суміжних з зерном збільшених розмірів та в матеріалі зв'язки, розташованому поміж ними, а і за їх межами. Екстремальні їх значення зменшуються зі зростанням відстані від робочого шару. Розподіл переміщень зерен наведено на рисунку 2.

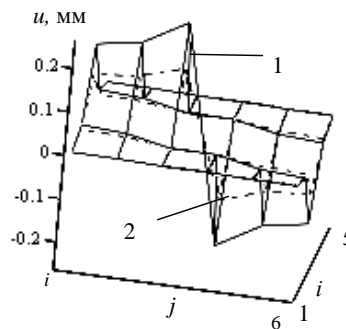


Рис. 2. Переміщення u зерен за номерами j , розташованими в рядах за номерами (1 – робочий шар, 2 – шар під робочим)

Характер переміщення зерен, як і розподіл сил, локальний. Зміна розміру призводить до протилежних переміщень зерен. Переміщення в робочому шарі більші. Різниця переміщень зерен супроводжується їх взаємним зсувом. Вона створює умови для виникнення дотичних напружень. Тангенси кутів зсуву матеріалу зв'язки в площинах, паралельних площині Δi , наведено на рисунку 3.

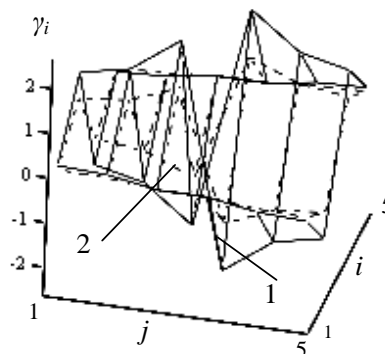


Рис. 3. Тангенси кутів зсуву матеріалу зв'язки γ_i в площинах, паралельних робочій поверхні, поміж зернами за номером j , що розташовані в рядах за номерами i (1 – робочий шар, 2 - шар під робочим)

Кути зсуву, внаслідок зміни напрямів переміщень, змінюють свій знак. Вони виникають локально. Наслідком взаємного зсуву зерен різних шарів у матеріалі зв'язки під робочим шаром є поява напруження зсуву. Вони пропорційні тангенсам кутів зсуву (рис. 4).

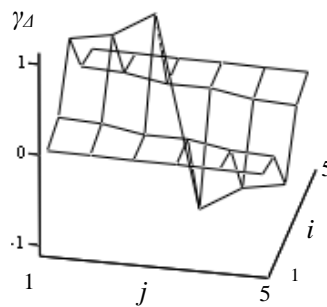


Рис. 4. Тангенси кутів зсуву матеріалу зв'язки γ_d зерен робочого шару їх зернами суміжного шару

Екстремальні кути зсуву в площині, нормальній до робочої поверхні інструменту та такої, що збігається з напрямом теплового розширення, менші майже удвічі, ніж в площині робочої поверхні за кубічної форми зерна. Вказане є наслідком локалізації зони збурень НДС інструменту, викликаного локальним збудником – зміною розміру одного зерна. Значення механічних характеристик складових інструменту входять до складу характеристичних показників – співмножників аргументів експонент. Вони впливають на розмір зони збурення. Останні визначаються значенням j , за якого $e^{-\kappa_{1,1}j(b+h)} \ll 1$. В такому випадку значення величин, до яких як множник входить експонента з від'ємним аргументом, безмежно мале відносно інших складових у виразах показників НДС інструменту. Переміщення та деформації в ортогональних напрямках до напрямку теплового деформування залежать від кількості зерен в інструменті в цих напрямках.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Методами механіки, з умови рівноваги довільного зерна абразивного інструменту ортотропної побудови, розроблено алгоритм визначення напружено-деформованого стану інструменту абразивної обробки у разі теплового розширення довільного зерна робочої поверхні в одному напрямі. Лінійність постановки задачі дозволяє визначати такий стан і для ортогонального напрямку в площині, паралельній робочій поверхні інструменту. Вказана послідовність може бути застосована до довільної кількості довільно розташованих на робочій поверхні інструменту зерен з різними тепловими змінами їх розмірів. Встановлено, що екстремальні напруження зсуву матеріалу зв'язки в площині, нормальній до робочої поверхні інструменту, майже удвічі менші за відповідні напруження в площині, паралельній робочої поверхні інструменту. Зона локального збурення НДС, викликаного тепловим розширенням зерна в напрямі дискретної координати j , визначається умовою:

$$\exp\left(-\operatorname{arch}\left(1 + \frac{gb}{Eh}\left(\cos\left(\frac{\pi}{K}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{M}\right) - 2\right)\right)j(b+h)\right) \ll 1.$$

Розміри зон збурення в ортогональних напрямках залежать від кількості зерен в інструменті в цьому напрямі. В подальшому доцільно розробити алгоритм урахування теплових змін розміру довільного зерна робочої поверхні інструменту в напрямі, нормальному до поверхні останнього.

Задача визначення напружено-деформованого стану інструменту абразивної обробки розв'язана на основі класичного методу механічної рівноваги довільного зерна робочої поверхні аналітичним методом у замкненій формі. Вказане дозволяє, в межах лінійної постановки задачі, отримані результати для ортогональної розташування зерен вважати такими, що мають достатньо високий рівень достовірності.

Список використаної літератури:

1. Кужельний Я.В. Аналіз методів дослідження процесу різання одиничним абразивним зерном під час шліфування / Я.В. Кужельний // Вчені записки ТНУ ім. Вернадського. Сер. : Технічні науки. – 2019.– Т. 30 (69), Ч. 1, № 3. – С. 23–27.
2. Музичка Д.Г. Підвищення ефективності шліфування твердих сплавів спрямованим обмеженням формозміни різальної поверхні шліфувальних кругів : автореф. дис. к.т.н. : 05.03.01 / Д.Г. Музичка. – Чернівці, 2015. – 23 с.
3. An Analysis of the Effect of Abrasive/Tool Wear on the Ductile Machining of Fused Silica from the Perspective of Stress / Ming Li, Xiaoguang Guo, Song Yuan and other // Micromachines. – 2022. – № 13 (6). – P. 820. DOI: 10.3390/mi13060820.
4. Study on wear behavior of grinding wheel for the generating process of UV grade fused silica / H.L. Chen, W.C. Lin, C.Y. Huang and other // Int. Soc. Opt. Photonics. – 2019. – 11175.
5. The effect of diamond wheel wear on surface and sub-surface quality in fused silica optics grinding / L.Zhou, Q.C. Wei, J.Li and other // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2019. – P. 677. – 022091.
6. Effect of friction coefficient on chip thickness models in ductile-regime grinding of zirconia ceramics / M.Yang, C.H. Li, Y.B. Zhang and other // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2019. – № 102. – P. 2617–2632.

7. Експериментальне дослідження процесу шліфування циліндричних поверхонь валів та опорних шийок розподільчого вала периферією орієнтованого круга в режимі затуплення / А.Єрошенко, Я.Кужельний, В.Морочко, В.Винник // *Технічні науки та технології*. – 2021. – № 3 (25). – С. 17–25.
8. Марчук В.І. До визначення силових параметрів процесу безцентрового шліфування кілець роликотідшипників переривчастими шліфувальними кругами / В.І. Марчук, Л.М. Равенець, Ештеїві Абдулсалам Мусбах // *Вісник ЖДТУ. Сер. : Технічні науки*. – 2015. – № 3 (74). – С. 34–39.
9. Гринюк С.В. Підвищення ефективності операцій безцентрового шліфування кілець роликотідшипників в умовах серійного виробництва : дис. ... к.т.н. : 05.02.08 / С.В. Гринюк. – Луцьк, 2021. – 162 с.
10. Полянський В.І. Визначення технологічних можливостей механічної обробки за температурним критерієм / В.І. Полянський // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – 2018. – № 36. – С. 172–180.
11. Федоренко Д.О. Удосконалення процесу алмазного шліфування кругами на керамічній зв'язці за рахунок забезпечення їх samozatuchuvannya : дис. ... к.т.н. : 05.03.01 / Д.О. Федоренко. – Харків, 2021. – 233 с.
12. Музичка Д.Г. Аналіз розрахункових схем та методів дослідження напруженого стану системи «зерно-зв'язка» / Д.Г. Музичка // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2018. – № 1. – С. 113–118.
13. Бурлаков В.І. Зміна напружень в надтвердій кераміці при вібро-абразивній обробці / В.І. Бурлаков // *Різання та інструмент в технологічних системах*. – 2019. – Вип. 91. – С. 220–227.
14. Кравченко Ю.Г. Розрахунок складових сили різання на передній поверхні абразивного зерна / Ю.Г. Кравченко, С.Т. Пацера // *Збірник наукових праць національного гірничого університету*. – 2020. – № 62. – С. 168–176.
15. Новіков Ф.В. Спрощений розрахунок температури різання при шліфуванні і лезвийної обробці / Ф.В. Новіков, В.І. Полянський // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – 2017. – № 17. – С. 87–92.
16. Determination of instantaneous temperature in the cutting zone during abrasive processing / В.В. Кальченко, А.М. Єрошенко, С.В. Бойко, П.Л. Ігнатенко // *Науковий вісник національного гірничого університету*. – 2019. – № 5. – С. 35–39.
17. Stress state of the grinding tool loaded with tangential force / K.S. Zabolotny, I.V. Belmas, O.I. Bilous and other // *Науковий вісник національного гірничого університету* / – 2022. – № 3. – С. 94–99.

References:

1. Kuzhelnyi, Ya.V. (2019), «Analiz metodiv doslidzhennia protsesu rizannia odyynychnym abrazyvnyim zernom pid chas shlifuvannia», *Vcheni zapysky TNU im. Vernadskoho. Ser. Tekhnichni nauky*, Vol. 30 (69), Part 1, No. 3, pp. 23–27.
2. Muzychka, D.H. (2015), *Pidvyshchennia efektyvnosti shlifuvannia tverdikh splaviv spriamovanyim обмеzhenniam formozminy rizalnoi poverkhni shlifovalnykh kruhiv*, PhD Abstract of dissertation, 05.03.01, Chernihiv, 23 p.
3. Ming, Li, Xiaoguang, Guo, Song, Yuan et al. (2022), «An Analysis of the Effect of Abrasive/Tool Wear on the Ductile Machining of Fused Silica from the Perspective of Stress», *Micromachines*, No. 13 (6), pp. 820, doi: 10.3390/mi13060820.
4. Chen, H.L., Lin, W.C., Huang, C.Y. et al. (2019), «Study on wear behavior of grinding wheel for the generating process of UV grade fused silica», *Int. Soc. Opt. Photonics*, 11175.
5. Zhou, L., Wei, Q.C., Li, J. et al. (2019), «The effect of diamond wheel wear on surface and sub-surface quality in fused silica optics grinding», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, pp. 677, 022091.
6. Yang, M., Li, C.H., Zhang, Y.B. et al. (2019), «Effect of friction coefficient on chip thickness models in ductile-regime grinding of zirconia ceramics», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, No. 102, pp. 2617–2632.
7. Ieroshenko, A., Kuzhelnyi, Ya., Morochko, V. and Vynnyk, V. (2021), «Eksperymentalne doslidzhennia protsesu shlifuvannia tsylindrychnykh poverkhon valiv ta opornykh shiyok rozpodilchoho vala peryferiieiu oriientovanoho kruha v rezhymy zatuplennia», *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, No. 3 (25), pp. 17–25.
8. Marchuk, V.I., Ravenets, L.M. and Eshteivi Abdulsalam Musbakh (2015), «Do vyznachennia sylovykh parametrov protsesu bezsentrivnogo shlifuvannia kilets rolykopydshypnykyv pereryvchastymy shlifovalnymy kruhamy», *Visnyk ZhDTU. Ser. Tekhnichni nauky*, No. 3 (74), pp. 34–39.
9. Hryniuk, S.V. (2021), *Pidvyshchennia efektyvnosti operatsii bezsentrivnogo shlifuvannia kilets rolykopydshypnykyv v umovakh seriinoho vyrobnytstva*, PhD Thesis of dissertation, 05.02.08, Lutsk, 162 p.
10. Polianskyi, V.I. (2018), «Vyznachennia tekhnolohichnykh mozhlyvosti mekhanichnoi obrobky za temperaturnym kryteriiem», *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*, No. 36, pp. 172–180.
11. Fedorenko, D.O. (2021), *Udoskonalennia protsesu almaznoho shlifuvannia kruhamy na keramichnii zviatzi za rakhunok zabezpechennia yikh samozatuchuvannia*, PhD Thesis of dissertation, 05.03.01, Kharkiv, 233 p.
12. Muzychka, D.H. (2018), «Analiz rozrakhunkovykh skhem ta metodiv doslidzhennia napruzhеного стану системи "зерно-зв'язка"», *Novi materialy i tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, No. 1, pp. 113–118.
13. Burlakov, V.I. (2019), «Zmina napruzhzen v nadtvordii keramitsi pry vibro-abrazyvni obrobtsi», *Rizannia ta instrument v tekhnolohichnykh systemakh*, Issue 91, pp. 220–227.
14. Kravchenko, Yu.H. and Patsera, S.T. (2020), «Rozrakhunok skladovykh syly rizannia na perednii poverkhni abrazyvnoho zerna», *Zbirnyk naukovykh prats natsionalnoho hirnychoho universytetu*, No. 62, pp. 168–176.
15. Novikov, F.V. and Polianskyi, V.I. (2017), «Sproshchenyi rozrakhunok temperatury rizannia pry shlifuvanni i lezvyinoi obrobtsi», *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*, No. 17, pp. 87–92.
16. Kalchenko, V.V., Yeroshenko, A.M., Boiko, S.V. and Ihnatenko, P.L. (2019), «Determination of instantaneous temperature in the cutting zone during abrasive processing», *Naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu*, No. 5, pp. 35–39.
17. Zabolotny, K.S., Belmas, I.V., Bilous, O.I. et al. (2022), «Stress state of the grinding tool loaded with tangential force», *Naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu*, No. 3, pp. 94–99.

Бельмас Іван Васильович – доктор технічних наук, професор Дніпровського державного технічного університету.

<https://orcid.org/0000-0003-2112-0303>.

Наукові інтереси:

– напружений стан ортотропних композитів.

E-mail: belmas09@meta.ua.

Білоус Олена Іванівна – кандидат технічних наук, доцент Дніпровського державного технічного університету.

<https://orcid.org/0000-0001-6398-8843>.

Наукові інтереси:

– напружений стан інструменту абразивної обробки;

– напружений стан ортотропних композитів.

E-mail: bilouselena66@gmail.com.

Танцура Ганна Іванівна – кандидат технічних наук, доцент Дніпровського державного технічного університету.

<https://orcid.org/0000-0002-8672-1153>.

Наукові інтереси:

– напружений стан інструменту абразивної обробки;

– напружений стан ортотропних композитів.

E-mail: hannaivan71@gmail.com.

Чухно Сергій Іванович – кандидат технічних наук, доцент Дніпровського державного технічного університету.

<https://orcid.org/0000-0001-6858-6528>.

Наукові інтереси:

– енергоресурсозбереження.

E-mail: zamdek@ukr.net.

Танцура Тимофій Олегович – аспірант Дніпровського державного технічного університету.

<https://orcid.org/0000-0001-6826-510X>.

Наукові інтереси:

– напружений стан інструменту абразивної обробки.

E-mail: timofiy.tanzura@gmail.com.

Belmas I.V., Bilous O.I., Tantsura G.I., Chukhno S.I., Tantsura T.O.

The effect of thermal expansion of abrasive grain on the stressed state of the tool

The purpose of the work is to develop a model and a method for determining the stress-strain state of the tool for abrasive processing of materials as an orthotropic composite with an arbitrary number of regularly spaced discrete grains connected by a bond material under the condition of a thermal increase in the size of an arbitrary grain of the working surface. The work establishes the following. The extreme shear stresses of the bond material in the plane normal to the working surface of the tool are almost twice as small as the corresponding stresses in the plane parallel to the working surface of the tool. The thermal increase in grain size, in accordance with the Saint-Venant's principle, locally disturbs the stress-strain state of the tool. The size of the zone of local disturbance caused by the thermal expansion of the grain in the direction of expansion depends on the mechanical properties of the components of the tool (moduli of elasticity for the tension of the grain material and for the shear of the bond material). In all directions, the size of the disturbance zones of the stress-strain state depends on the number of grains in the tool in directions orthogonal to the direction of the thermal change in grain size. The obtained results make it possible to comprehensively take into account the composite orthotropic construction, the mechanical properties of the components of the tool in which, due to thermal expansion, the size of the arbitrary grain of the working surface has increased. The linearity of the problem statement allows, by summing up the results for the changes in the sizes of individual, several arbitrarily located grains, and at an arbitrary heating temperature of the grains, to determine the total stress-strain state. The obtained dependencies, at the stage of development of the processing technology, allow us to quantitatively estimate the stress level in the tool, to predict the likely number of load cycles before failure, to influence the value of stresses by selecting materials at the stage of tool manufacturing, to choose cutting modes at the stage of technology development, how to increase the efficiency of using the abrasive tool processing

Keywords: grinding tool; grain, bundle; thermal expansion; moving; forces; mechanical properties.

Стаття надійшла до редакції 10.03.2023.