

6. Internal void closure during the forging of large cast ingots using a simulation approach [Электронный ресурс] / Lee Y. S., Lee S. U., Van Tyne C. J., Joo B. D., Moon Y. H. // J. Mater Process Tech. – 2011. – 211(6). – P. 1136–1145. Режим доступа: URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.017>.
7. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state [Электронный ресурс] / О. Е. Markov, А. V. Perig, V. N. Zlygoriev, М. А. Markova, А. G. Grin // International Journal of Advanced Manufacturing Technology – 2017. 90: 801 – 818. Режим доступа: URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>

УДК 621.922.02. 001.5

ТАНЦУРА Г. І., к.т.н. доцент
ВІННІЧЕНКО Є. Є., студент
КОВАЛЕНКО А. С., студент
НАЗАРЕНКО О. О., студент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна

ВПЛИВ ДОТИЧНОЇ СИЛИ РІЗАННЯ НА НАПРУЖЕНИЙ СТАН ШЛІФУВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Вступ. Машинобудування – база технічного розвитку суспільства. Остаточна механічна обробка поверхонь – складова системи забезпечення якості продукції в машинобудуванні. Остаточна механічна обробка здебільшого пов'язана зі шліфуванням. Шліфувальний інструмент складається з абразивних зерен з'єднаних в єдину конструкцію спеціальним матеріалом – зв'язкою. В процесі шліфування зерна періодично входять в контакт з деталлю та обробляють її поверхню. Руйнуються зерна, зношуються їх різальні кромки. Руйнується зв'язка. Зерна випадають. Руйнування зв'язки та випадання зерен призводить до відкриття на поверхні інструменту зерен з не зношеними різальними кромками. Відновлюється абразивна властивість робочої поверхні інструменту шліфування. Залежність вказаних факторів від сил різання зумовлює можливість оптимізації технологічних параметрів обробки шліфуванням та зносу інструменту в процесі її реалізації. Руйнування матеріалу зв'язки залежить від її механічних властивостей та напруженого стану, що в ній виникає в процесі механічної обробки. Визначення залежності напруженого стану шліфувального інструменту від характеру його навантаження, побудова аналітичних залежностей для визначення напруженого стану шліфувального інструменту в процесі його використання – актуальна задача.

Постановка задачі. Дослідженню навантажень, відновленню різальної здатності шліфувального інструменту присвячена значна кількість робіт. В дисертації Музички [1] досліджені особливості зміни форми робочої поверхні шліфувального круга при взаємодії інструменту з деталлю. Силова взаємодія абразивних зерен та матеріалу, що їх утримує, досліджена в роботі А. Н. Ушакова [2], Модель абразивного інструменту, як система дискретних пружних елементів, сформульована в [3]. В роботі [4] досліджено вплив зосередженого навантаження на зерно. В статті [5] проаналізовані силові параметри процесу безцентрового шліфування. В роботі [6] досліджено випадок нормального навантаження зерен в зоні взаємодії інструмента з деталлю, що обробляється.

В наведених роботах не досліджувався напружений стан матеріалу круга зумовлений дотичним прикладенням сили до різального зерна. На знайдені аналітичні вирази для визначення напружень в шліфувальному крузі, що не дозволяє оптимізувати технологічні процеси шліфування та зносу робочого інструменту. Як і в [6] розглянемо мате-

ріал шліфувального круга, як композит в якому габарити шліфувального круга значно перевищують габарити поверхні його взаємодії з деталлю в процесі її обробки. Розміри ділянки взаємодії шліфувального круга значно більші за розміри шліфувальних зерен - основних складових, що передають навантаження матеріалу зв'язки шліфувального інструмента. Механічні характеристики абразивних зерен та матеріалу, що їх з'єднує відмінні. Усереднення значення механічних характеристик складових композитного матеріалу здійснено за Фойхтом.

Результати роботи. Розглянемо випадок прикладення сили до окремого зерна. Матеріал шліфувального круга займає півпростір $0 \leq z \leq \infty$. На поверхню вказаного матеріалу в точці з координатами $x = y = z = 0$ діє зосереджена дотична сила в напрямку осі x . Вказана задача відома як задача Черугті [7]. Задача може бути розв'язана з використанням двох наступних функцій Ері.

$$\varphi_1 = \frac{T}{4\pi(1-\mu)} \left\{ R + 2(1-\mu)(1-2\mu) \left[z \ln(R+z) - R \right] \right\}, \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \frac{T}{4\pi(1-\mu)} (1-2\mu) x \ln(R+z). \quad (2)$$

Напруження в пружному матеріалі визначаються наступними залежностями.

$$\sigma_x = \frac{T}{2\pi} \left\{ 3 \frac{x^3}{R^5} + \frac{2x}{\frac{4\mu}{(1-2\mu)} + 1} \left[\frac{3}{R(R+z)^2} - \frac{x^2(3R+z)}{R^3(R+z)^3} - \frac{1}{R^3} \right] \right\}, \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{T}{2\pi} \left\{ 3 \frac{xy^2}{R^5} + \frac{2x(1-2\mu)}{2\mu+1} \left[\frac{3}{R(R+z)^2} - \frac{y^2(3R+z)}{R^3(R+z)^3} - \frac{1}{R^3} \right] \right\}, \quad (4)$$

$$\sigma_z = \frac{3T}{2\pi} \frac{xz^2}{R^5}, \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{T}{2\pi} \left\{ 3 \frac{x^2y}{R^5} + \frac{2y}{\frac{4\mu}{(1-2\mu)} + 1} \left[\frac{3}{R(R+z)^2} - \frac{x^2(3R+z)}{R^3(R+z)^3} \right] \right\}, \quad (6)$$

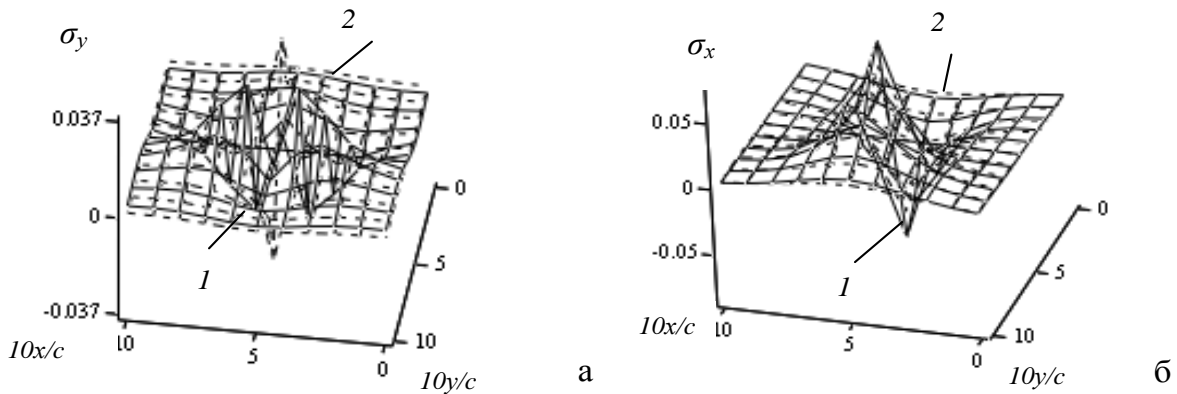
$$\tau_{yz} = \frac{3T}{2\pi} \frac{xyz}{R^5}, \quad (7)$$

$$\tau_{xz} = \frac{3T}{2\pi} \frac{x^2z}{R^5}, \quad (8)$$

де

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

У вказаному півпросторі виокремимо частину простору розмірами c^3 ($c = 1$). Цю зону будемо розглядати як абразивне зерно та дослідимо розподіл напружень по його поверхні від одиничного навантаження. Це дозволяє отримані напруження розглядати як відносні напруження. Спрямуємо силу вздовж осі x . Коефіцієнт Пуассона приймемо рівним його граничним значенням. Визначимо розподіл напружень за залежностями (3), (4) та (6). Визначені напруження для поверхні $z = c$ наведено на рисунках 1 та 2.



1 – коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,5$; 2 – коефіцієнт Пуассона $\mu = 0$

Рисунок 1 – Розподіли відносних нормальних σ_y (а) та σ_x (б) напружень по грані шліфувального зерна $z = c$ у разі дії зосередженого навантаження дотичною силою

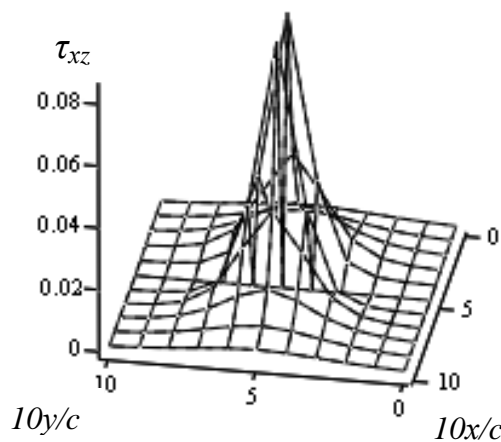
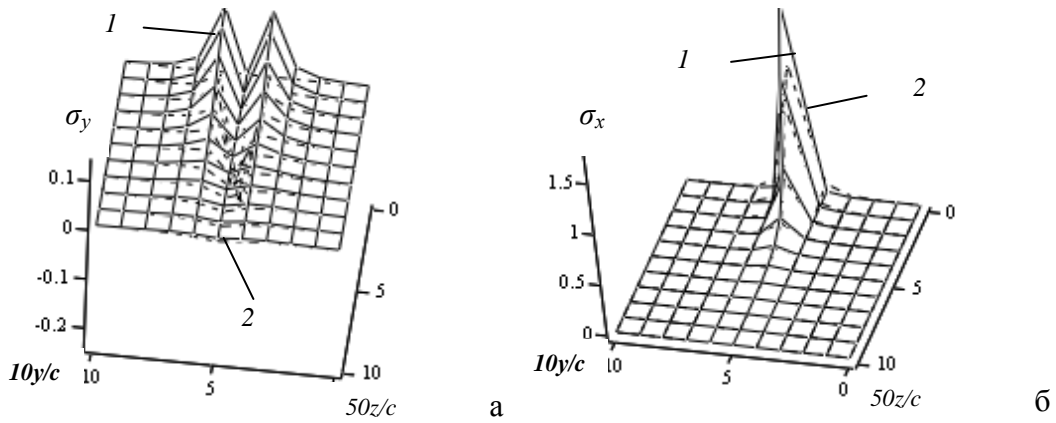


Рисунок 2 – Розподіли відносних дотичних τ_{xz} напружень по грані шліфувального зерна $z = c$ у разі дії зосередженого навантаження дотичною силою

Отримані графічні залежності відтворюють локальність зміни напруженого стану матеріалу, що пов'язує абразивні зерна. Вони показують наявність двох локальних екстремумів і є наслідком зміни знаку нормальних напружень відносно точки прикладення сили. На поверхні, що відповідає найбільш віддаленій поверхні зерна від робочої поверхні абразивного інструменту, максимальні нормальні та дотичні напруження менші за 10 % середнього навантаження. Властивість матеріалу (значення коефіцієнту Пуассона) не суттєво впливають на розподіл нормальних напружень. Дотичні напруження (8) не залежать від коефіцієнту Пуассона оскільки не призводять до деформацій пов'язаних зі зміною обсягів матеріалу.

Розподіл напружень по передній умовній грані зерна $x=c/2$ наведено на рис. 3–4.



1 – коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,5$, 2 – коефіцієнт Пуассона $\mu = 0$

Рисунок 3 – Розподіли відносних нормальних σ_y (а) та σ_x (б) напружень по грані шліфувального зерна $x=c/2$ у разі дії зосередженого навантаження дотичною силою

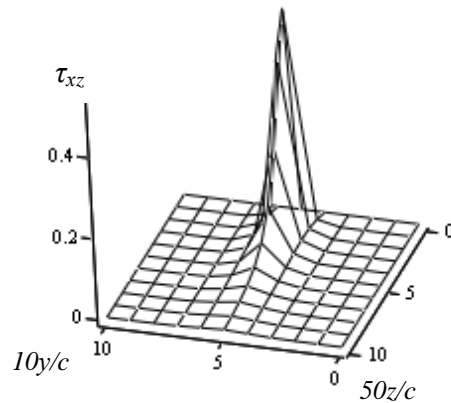


Рисунок 4 – Розподіли відносних дотичних τ_{xz} (б) напружень по грані шліфувального зерна $x=c/2$ у разі дії зосередженого навантаження дотичною силою

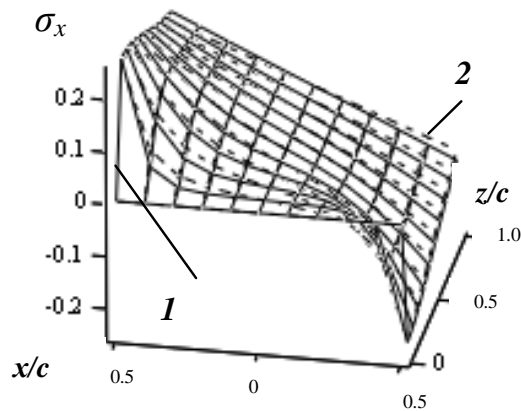
Як і слід було очікувати, напруження в матеріалі розташованому на передній поверхні різального зерна максимальні. Екстремальні нормальні напруження σ_x перевищують середні напруження зсуву та сягають 150 % їх значення. По поверхні $x=-c/2$ мають місце напруження розтягу. Напруження по висоті зерна (вздовж осі z), практично, вирівнюються на його п'ятій частині.

Вище ми розглянули випадок прикладення до зерна зосередженого зусилля. Вказане можна вважати моделлю взаємодії вершини зерна з матеріалом деталі. Розглянемо випадок прикладення сили по прямій лінії паралельній осі x . Врахуємо симетричність навантаження відносно осі y та проти симетричність відносно площини $x = 0$. Визначимо напруження для половини грані умовного одиничного куба шляхом інтегрування виразів (3) та (8).

$$X_x \left(x, \frac{1}{2}, z \right) = \int_0^{\frac{1}{2}} \left(\int_0^x \sigma_x \left(x, \frac{c}{2}, z \right) dx - \int_x^1 \sigma_x \left(x, \frac{c}{2}, z \right) dx \right) dy,$$

$$\tau_{zx} \left(x, \frac{1}{2}, z \right) = \int_0^{\frac{1}{2}} \left(\int_0^x \tau_{zx} \left(x, \frac{c}{2}, z \right) dx + \int_x^1 \tau_{zx} \left(x, \frac{c}{2}, z \right) dx \right) dy.$$

Результати розрахунків наведено на рис. 5 та 6.



1 – коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,5$; 2 – коефіцієнт Пуассона $\mu = 0$

Рисунок 5 – Розподіли відносних нормальних напружень X_x по грані шліфувального зерна $y=c/2$ у разі дії розподіленого навантаження дотичною силою

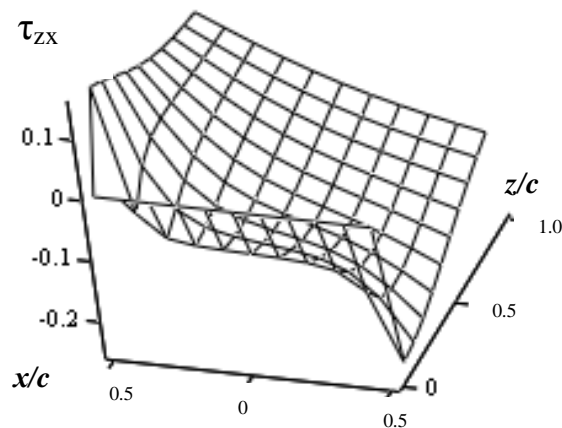


Рисунок 6 – Розподіли відносних дотичних напружень по грані шліфувального зерна $y=c/2$ у разі дії розподіленого навантаження дотичною силою

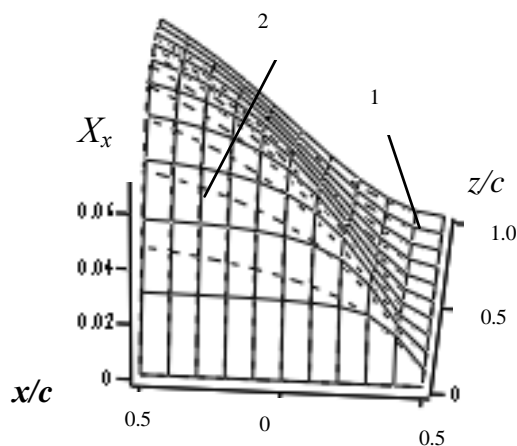
Отримані розподіли відтворюють характер впливу дотичного навантаження на напружений стан шліфувального інструменту. Нормальні та дотичні напруження, що виникають внаслідок дії зовнішнього дотичного навантаження, мають максимуми в обсягах матеріалу біля поверхні до якої прикладене навантаження. Зменшуються їх значення зі збільшенням відстані від поверхні до якої прикладене зовнішнє навантаження. При цьому напруження розподілені асиметрично. Вказане зумовлює циклічний знакозмінний стан. Відзначимо, що знакозмінні напруження більше за інші впливають на зменшення витривалості матеріалу.

В розглянутих вище випадках сила прикладена симетрично осі $x = 0$. В загальному випадку точка прикладення сили може не збігатися з центром грані зерна. Крайніми випадками її зміщення вздовж осі x може бути її прикладення в точках з координатами $x = \pm c/2$. Вказане створює момент сил. Вплив моменту сил визначимо із наступних залежностей.

$$X_x \left(x, \frac{1}{2}, z \right) = \int_0^{\frac{1}{2}} \left(\int_0^x \sigma_x \left(x, \frac{c}{2}, z \right) x dx - \int_x^1 \sigma_x \left(x, \frac{c}{2}, z \right) x dx \right) dy,$$

$$\tau_{zx} \left(x, \frac{1}{2}, z \right) = \int_0^{\frac{1}{2}} \left(\int_0^x \tau_{zx} \left(x, \frac{c}{2}, z \right) x dx + \int_x^1 \tau_{zx} \left(x, \frac{c}{2}, z \right) x dx \right) dy,$$

Результати розрахунків наведено на рис. 7 та 8.



1 – коефіцієнт Пуассона $\mu=0,5$; 2 – коефіцієнт Пуассона $\mu=0$

Рисунок 7 – Розподіли відносних нормальних σ_x напружень по грані шліфувального зерна $y=c/2$ у разі дії моменту прикладення дотичного навантаження

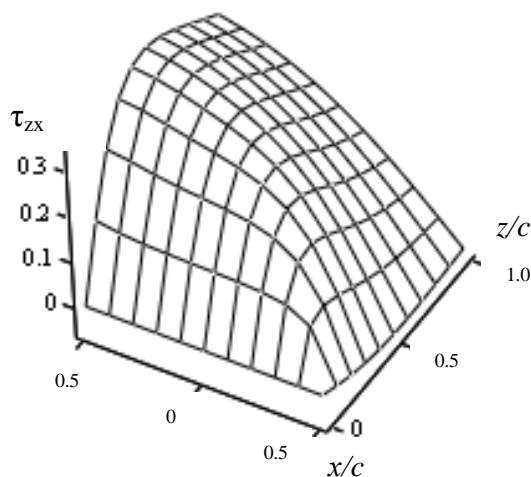


Рисунок 8 – Розподіли відносних дотичних напружень по грані шліфувального зерна $y=c/2$ у разі дії моменту прикладення дотичного навантаження

Нормальні та дотичні напруження мають максимуми в обсягах матеріалу біля поверхні навантаження. Зменшуються зі зростанням відстані від поверхні. При цьому вони асиметричні. Зосереджені навантаження призводять до менших напружень. Найбільший вплив викликають напруження розподілені по осі що збігається з напрямком прикладення дотичного навантаження. Ці два випадки можна розглядати як межі значень напружень, що виникають по в матеріалі зв'язки по граням абразивних зерен в шліфувальному інструменті.

Висновки. Навантаження окремого шліфувального зерна зосередженим дотичним зусиллям зумовлює складний напружено-деформований стан матеріалу зв'язки. Напруження в ній нерівномірно розподілені по бічній поверхні абразивного зерна. Екстремальні нормальні напруження σ_x перевищують середні напруження зсуву. Найбільший вплив викликають напруження розподілені по осі що збігається з напрямком прикладення дотичного навантаження. Ці два випадки визначають межі значень напружень, що виникають в матеріалі зв'язки по граням абразивних зерен в шліфувальному інструменті. Напружений стан матеріалу зв'язки залежить від її механічних властивостей. Застосування матеріалу зв'язки з більшими значеннями коефіцієнту Пуассона призводить до більших максимальних напружень в матеріалі за незмінних інших величин. В загальному випадку, застосування матеріалу зв'язки з більшими значеннями коефіцієнту Пуассона веде до зменшення витривалості матеріалу зв'язки та зменшення часу до моменту випадання кристалів. Вказане явище може бути використане для своєчасного оновлення різальних кромки інструменту. Встановлені розподіли напружень, аналітичні залежності для їх визначення надають можливість прогнозування кількості циклів навантаження матеріалу зв'язки абразивних зерен в шліфувальному інструменті до його руйнування при заданому зусиллі різання.

Напрямою подальших досліджень слід вважати визначення показників витривалості матеріалів шліфувальних кругів при циклах навантаження та на їх основі встановлення оптимальних умов руйнування матеріалу, що утримує абразивні зерна шліфувального круга та зносу їх різальних кромки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Музичка Д. Г. Підвищення ефективності шліфування твердих сплавів спрямованим обмеженням формозміни різальної поверхні шліфувальних кругів. Автореф. дис. канд. техн. наук. : 05.03.01 / Д. Г. Музичка; Чернігівський національний технологічний університет. – 2015. – 23 с.
2. Ушаков А. Н. Разработка модели напряженно-деформированного состояния «абразивное зерно-связка» / А. Н. Ушаков // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – № 42(1085). – С. 59–64.
3. Островский В. И. Теоретические основы процесса шлифования : монография / В. И. Островский // Л. Изд-во Ленинградского университета, 1981. – 141 с.
4. Коротков В. А. Геометрия и напряженное состояние ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формой / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // Обработка металлов. – 2014. – № 2(64). – С. 62–77.
5. Марчук В. І., Ештеві Абдулсалам. До визначення силових параметрів процесу безцентрового шліфування кілець роликотішлипників переривчастими шліфувальними кругами / В. І. Марчук, Л. М. Равенець, Е. А. Мусбах // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2015. – № 3(74). – С. 34–39.
6. Танцура Г. І. Напружений стан шліфувального круга від дії зосередженого радіального тиску на зерно / Г. І. Танцура, М. О. Білоус // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. – Каменське : ДДТУ, 2017. – Випуск 1(30). – С. 69–73.
7. Рекач В. Г. Руководство к решению задач по теории упругости / В. Г. Рекач. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М. : «Высшая школа», 1977. – 216 с.