

## Визначення напруженого стану на задній поверхні різального інструменту

У роботі розглядаються питання теоретичного розрахунку нормальних і дотичних напружень на контактній ділянці задньої поверхні різального інструменту. Поле напружень визначається методом скінченних елементів шляхом суперпозиції полів напружень від сил, що діють на площині зсуву, і напружених полів від пружного відновлення поверхні різання, яке імітується втискуванням «штампу» задньої поверхні у поверхню різання до досягнення прийнятого критерію пластичності. При цьому враховуються сили тертя, що діють на задній поверхні інструменту, та зміцнення поверхневого шару поверхні різання в результаті пластичної деформації в зоні первинних пластичних деформацій. Встановлено, що сили, які діють на площині зсуву, деформують поверхню різання таким чином, що першою вступає в контакт з поверхнею різання точка задньої поверхні, віддалена від вершини. Це призводить у подальшому до різкого збільшення напружень у цій точці. Крім того, епюра дотичних напружень тертя сильно залежить від форми самої фаски зношування задньої поверхні в зоні контакту. Будь-яка штучно створена фаска дає таку ж штучну епюру напружень. Як показало комп'ютерне моделювання процесу зношування задньої поверхні, у ході припрацювання протягом декількох секунд на задній поверхні починається більш інтенсивне зношування ділянок із більшими напруженнями, після чого напруження на задній поверхні вирівнюються, стаючи продовженням напружень у кінці загальмованого тіла передньої поверхні. Запропонована методика і комп'ютерний алгоритм розрахунку контактних напружень у єдиному комплексі: деформації – напруження – температури – зношування.

**Ключові слова:** сили на площині зсуву; поле напружень на задній поверхні при різанні; тертя на задній поверхні; зношування фаски; загальмоване тіло.

**Актуальність теми.** Вивчення контактних навантажень на задній поверхні інструменту (ЗПІ) має велике значення як для теоретичних розрахунків, так і для розробки практичних рекомендацій. Так В.О. Остаф'євим [2] встановлено, що їх наявність позитивно впливає на напружений стан різальної частини: підвищуються середні стискаючі напруження, що попереджує появу небезпечних для інструментальних матеріалів напружень розтягу. Закон зміни дотичних напружень на ЗПІ визначає інтенсивність теплового потоку тертя і температуру на цій поверхні [4, 7]. В кінцевому підсумку це визначає інтенсивність зношування в кожній точці контактної поверхні [5].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор.** Дослідження розподілу контактних навантажень на ЗПІ проводиться як експериментальними методами, так і теоретичними. Для їхнього визначення першим способом був використаний метод розрізного різця [2]. Однак дані, отримані різними авторами, сильно різнилися, як за формою встановлених залежностей, так і за їх поведінкою зі зміною умов різання. Причиною цьому є мала роздільна здатність (чутливість) розрізного різця, що може бути оцінена мінімальною величиною контактної ділянки, для якої ще вдається одержати достовірні результати. Для розрізного різця – це 0,15...0,2 мм. Із цієї позиції можна говорити лише про дослідження контактних напружень інструменту із досить широкою спеціально сформованою штучною плоскою ділянкою контакту по ЗПІ [2, 3].

Оскільки напруження на ЗПІ в основному є наслідком пружної післядії поверхні різання, то характер їх зміни визначається формою зони контакту на ЗПІ, що взаємодіє з поверхнею різання. Тобто під час експериментів були отримані епюри не для реальної зношеної поверхні, а для штучно створеної, що від неї відрізняється. Не слід також забувати той факт, що підвищені значення напружень на будь-якій ділянці контакту неодмінно викличуть більш інтенсивне її зношування, зміну форми і, як наслідок, зміну епюри напружень. Через те експериментальні способи так і не змогли дати однозначної відповіді про контактні напруження на ЗПІ.

На складну природу контактного тиску на задній поверхні вказує М.Ф. Полетіка [3]. Так на ділянці, що прилягає до різальної кромки, поле напружень нерозривно пов'язане із загальним напруженим полем під зоною пластичних деформацій і є його частиною, а не тільки як реакція на пружне відновлення поверхні різання. На іншій частині задньої поверхні цей зв'язок слабшає і природу напружень можна розглядати тільки як результат пружного відновлення поверхневого шару після проходження різального леза.

**Метою статті** є визначення характеру розподілу напружень на задній поверхні інструменту методом скінченних елементів (МСЕ), шляхом суперпозиції напруженого поля від дії навантажень на площині

зсуву і напруженого поля від втискування (операції, зворотній пружному відновленню) «штампа-інструмента» довільної форми в поверхню різання з урахуванням сил тертя на задній поверхні.

**Викладення основного матеріалу.** Для розв'язання цієї задачі була створена базова модель МСЕ [1], вказана на рисунку 1, яка складається з частини оброблюваної поверхні  $CD$ , площини зсуву  $DE$  та поверхні різання  $EF$  (прямолінійної чи кругової). Модель розбита на елементи, розміри яких змінюються відповідно до нерівномірного розподілу напружень, розміром контактної ділянки на ЗПІ  $l_2$  та товщиною зрізаного шару –  $a$ . В зонах перехідних кривих на ЗПІ модель розбита на більш дрібні елементи, розміри яких можуть бути однаковими або збільшуватися за законом геометричної прогресії від країв контактної ділянки до її середини. Деталь прийнята нерухомою, а переміщення надаються інструменту.

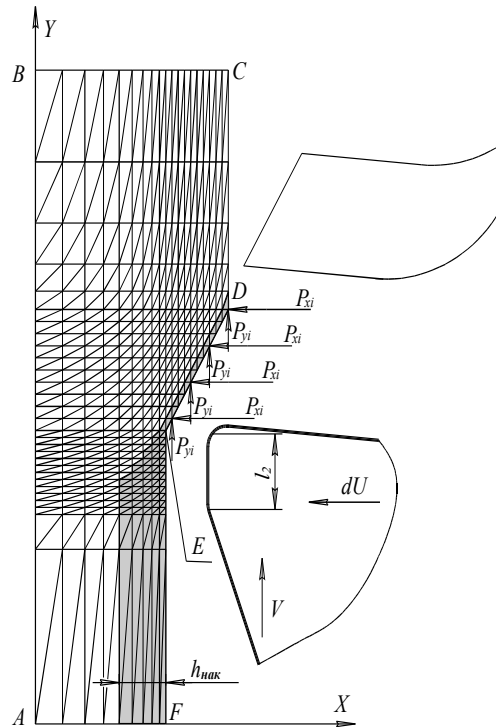


Рис. 1. Базова модель для розрахунку контактних напружень методом скінченних елементів

У вузлах елементів, що виходять на площину зсуву, діють вертикальні  $P_{yi}$  та горизонтальні  $P_{xi}$  сили, величини яких визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} P_{xi} &= \frac{\tau_{\phi} a}{n_{\phi}} - \frac{a}{n_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \phi} \left[ \sigma_{\phi D} + \frac{i-1}{n_{\phi}-1} (\sigma_{\phi E} - \sigma_{\phi D}) \right]; \\ P_{yi} &= \frac{\tau_{\phi} a}{n_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \phi} + \frac{a}{n_{\phi}} \left[ \sigma_{\phi D} + \frac{i-1}{n_{\phi}-1} (\sigma_{\phi E} - \sigma_{\phi D}) \right], \end{aligned} \quad (1)$$

де  $n_{\phi}$  – кількість навантажених вузлів елементів, розміщених на площині зсуву,  $\phi$  – кут зсуву.

Дотичні  $\tau_{\phi}$  та нормальні напруження  $\sigma_{\phi E}$  і  $\sigma_{\phi D}$  в точках  $E$  і  $D$  моделі визначалися за допомогою термомеханічної моделі процесу різання [1].

Розв'язання першої частини контактної задачі дозволяє визначити напружене поле в моделі від дії прикладених сил  $P_{xi}$ ,  $P_{yi}$ ,  $i = \overline{1 \dots n_{\phi}}$ , а другої частини – розрахувати поля напружень від втискування несиметричного штампа – ЗПІ.

Основою для розрахунку за формулами (1) поля сил, що діють на площині зсуву, є дотичні і нормальні напруження, що там виникають в ході перетворення зрізаного шару в стружку. Під час розрахунків враховувалося, що всі пластичні деформації концентруються у вузькій зоні зсуву, за межами якої матеріал деформується тільки пружно. Дотичні напруження рівномірні вздовж площини зсуву, а нормальні змінюються за лінійним законом.

В моделі МСЕ ефект зміцнення поверхневого шару поверхні різання, що має місце в зоні первинної пластичної деформації, можна врахувати, ввівши шар елементів вздовж площини зсуву і поверхні різання зі збільшеною величиною межі текучості (на рис. 1 показано сірим кольором) [1].

Відповідно до рекомендацій [6], друга частина контактної задачі розв'язується у такому порядку: надається приріст переміщенню інструменту  $dU_i$  в контактних вузлах, розраховуються прирости переміщень, деформацій і напружень у вузлах моделі; змінюються координати вузлових точок і знову надається приріст переміщенню інструменту, аж поки втискування (деформація) не досягне величини, що визначається прийнятним критерієм пластичності прийнятих елементів моделі.

Представлення напружень на задній поверхні тільки як реакції на втискування профільного «штампа-інструмента» не повністю адекватне реальності, оскільки при цьому ігноруються сили тертя, що виникають під час руху штампа відносно поверхні різання. Якщо взяти коефіцієнт тертя  $\mu_2 \approx 0,7 \dots 1,4$  [3, 8, 11], видно, що на кожному етапі деформації приріст сил тертя буде приблизно рівний приросту нормальних сил. Безпосередньо МСЕ не дозволяє врахувати рух «штампа-інструмента» в умовах тертя, тому була запропонована така методика.

Нехай після чергового приросту деформації  $i$ -го вузла в ньому виникли прирости сил  $\Delta P_{xi}$  і  $\Delta P_{yi}$ . Спроекувавши їх на напрямок нормалі до профілю, одержимо приріст нормальної сили тиску на поверхню штампа:

$$\Delta N_i = \Delta P_{yi} \cos \delta_i - \Delta P_{xi} \sin \delta_i.$$

За наявності тертя між поверхнею штампа і вузлом виникне сила тертя, приріст якої дорівнює:

$$\Delta F_i = \mu_{2i} (\Delta P_{yi} \cos \delta_i - \Delta P_{xi} \sin \delta_i) \quad (2)$$

і направлений в сторону руху «штампа-інструмента» по поверхні різання. Розклавши цю силу вздовж осей координат, одержимо додаткові сили  $\Delta F_{xi}$  і  $\Delta F_{yi}$ , що діють на  $i$ -й вузол елемента. Врахувати їх вплив на загальний напружений стан моделі можна теж методом скінченних елементів, але вхідними даними будуть не переміщення заданих вузлів, а діючі на них сили.

Таким чином, повний цикл втискування штампа з моделюванням тертя між контактними поверхнями «штампа-інструмента» і поверхні різання буде складатись з етапів:

1. Втискування «штампа-інструмента» в модель і розрахунок приростів деформацій і переміщень у всіх вузлах моделі. Розрахунок приросту вузлових сил в контактних вузлах;
2. Розрахунок приростів сил тертя у контактних вузлах за формулами (2);
3. Розрахунок приростів деформацій  $\Delta x_0$  і  $\Delta y_0$ , переміщень і нових координат вузлів моделі, які вони отримали внаслідок дії приростів сил тертя  $\Delta F_{xi}$  і  $\Delta F_{yi}$ ;
4. Додавання приростів напружень до загального напруженого поля моделі;
5. Зсув «штампа-інструмента» в напрямку дії сили тертя на відстані  $\Delta x_0$  і  $\Delta y_0$ .

На цьому цикл закінчується і, якщо не виконані прийняті умови, починається новий з п. 1.

Перевірка розробленої моделі шляхом порівняння з аналітичним розв'язком М.М. Зорева [9] на прикладі втискування плоского симетричного штампа із заокругленими краями в пружну поверхню показала хороший збіг результатів.

Крім поля напружень попередньо-навантаженої моделі, на загальний кінцевий напружений стан ЗПП буде впливати і форма контактної поверхні різання, що деформується під дією сил площини зсуву. Як видно з рисунку 2, найбільшу деформацію вздовж осей  $x$  і  $y$  мають точки, наближені до площини зсуву. Далі вона зменшується і поверхня різання набуває випуклої форми. Величини деформації вузлів поверхні різання є величинами одного порядку із кроком переміщення «штампа-інструмента» МСЕ ( $10^{-5} \dots 10^{-6}$  мм), що, безумовно, буде впливати на умови початку контакту і подальший його розвиток в ході втискування «штампа-інструмента».

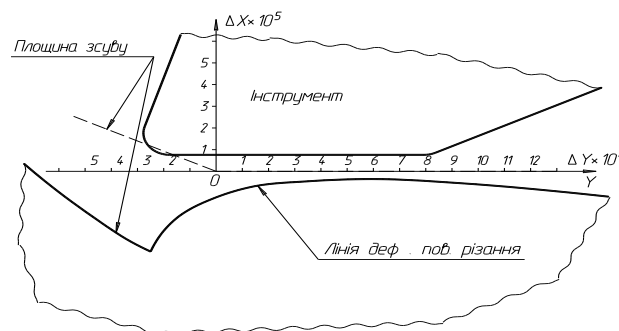


Рис. 2. Схема деформації контактної частини поверхні різання під дією напружень на площині зсуву

Проте варто зауважити, що розраховані таким чином напруження не будуть відповідати дійсності, через те що в системі різання всі процеси взаємозалежні: визначений напружений стан внесе зміни у температурне поле зони різання, а воно, у свою чергу, змінить параметри пластичної деформації у формулах (1). Тому у розробленій моделі розраховане поле напружень передається в програмний блок по розрахунку параметрів пластичної деформації і температур, результати яких враховуються у повторному розрахунку контактних напружень на ЗПІ. Цей ітераційний цикл повторюється до одержання стабільних результатів.

Оскільки одержані напруження і температури були розраховані для якоїсь штучно створеної фаски контакту по ЗПІ, подальша задача полягає у встановленні дійсної форми ЗПІ і зв'язаної з нею епюри напружень та інших параметрів. Для цього була досліджена динаміка зміни форми фаски і епюри напружень в ході зношування інструменту за методикою, представленою в [1, 11]. Для прикладу був розрахований напружений стан контактної зони при струганні заготовки із сталі ШХ15 різцем із твердого сплаву ВК8 при коефіцієнті тертя  $\mu_2 = 1 \dots 0,7$  (змінному вздовж контакту по задній поверхні). Контактна поверхня інструменту на початку приймалась плоскою із заокругленими краями радіусами:  $\rho_1 = 0,02$  мм в області вершини інструмента [10] і  $\rho_2 = 0,2$  мм в області переходу до задньої поверхні, нахиленої під кутом  $\alpha$  [9].

Із рисунка 2 видно, що плоска поверхня «штампа-інструмента» почне контактувати з деформованою поверхнею різання своєю найбільш віддаленою від вершини ділянкою. В подальшому зона контакту буде розширюватися у напрямку вершини, але найбільші напруження будуть мати місце в зоні початкового контакту. Тому це неминуче приведе до виникнення великого кромкового тиску і напружень тертя в області точки  $M$  (рис. 3, б). Це викликає посилене зношування-припрацювання такої зони (рис. 3, а). Кінцевій стадії припрацювання фаски зношування, що триває декілька секунд (за промислово застосовуваних швидкостей різання) і визначає реальну форму контактної поверхні на ЗПІ, відповідає рівномірна залежність інтенсивності зношування у всіх точках ЗПІ (рис. 3, а).

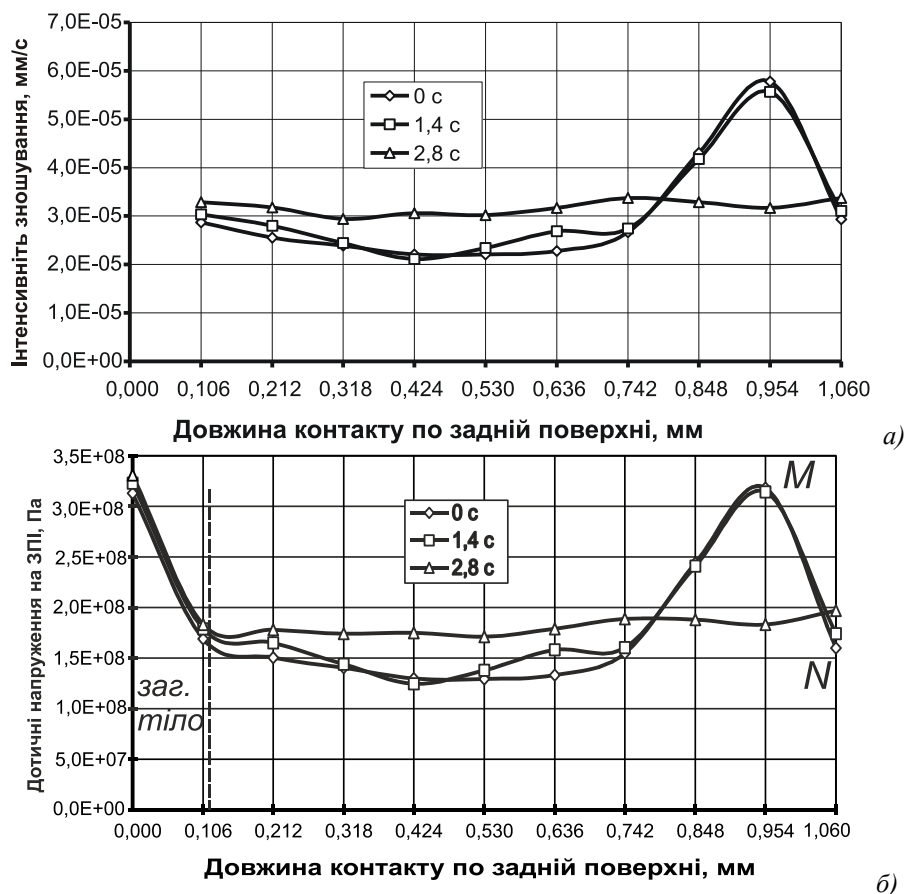


Рис. 3. Зміна інтенсивності зношування (а) і дотичних напружень (б) по задній поверхні у ході припрацювання ЗПІ при струганні сталі ШХ15 різцем із твердого сплаву ВК8 (цифри на графіках – час припрацювання) ( $a = 0,1$  мм,  $b = 1$  мм,  $V = 1$  м/с,  $h_3 = 1$  мм,  $\gamma = 0$ )

Установлений стан контактної взаємодії дозволяє одночасно визначити результуючий закон розподілу напружень на ЗПП як наслідок полів напружень від зони деформації і зони пружного відновлення поверхні різання (рис. 3, б). Як видно, в області пластичного контакту загальмованого тіла на передній поверхні напруження тертя (зсуву) падають внаслідок підвищення температури шарів, що зсуваються, а потім залишаються приблизно постійними до точки *M*, де потім різко зменшуються до точки *N* – припинення контакту з поверхнею різання. При цьому проходить зниження максимуму температури і вирівнювання епюр дотичних напружень тертя на фасці зношування. Отримані залежності дозволяють передбачати характер зміни температур на ЗПП і в підсумку спрогнозувати процес зношування інструменту.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Висновком із зазначених результатів може бути той факт, що неможливо отримати як теоретично, так і експериментально реальну картину напруженого стану на задній поверхні інструменту, представляючи її як штучно створену плоску фаску, паралельну швидкості різання. Форма фаски самоформується внаслідок різної інтенсивності припрацювання-зношування в контактних точках, яке, в свою чергу, є наслідком нерівномірних контактних температур, нормальних та дотичних напружень. У результаті цього напруження тертя (зсуву) спочатку падають на довжині загальмованого тіла внаслідок підвищення температури шарів, що зсуваються, а потім залишаються приблизно постійними і в кінці різко зменшуються до точки припинення контакту з поверхнею різання. Оскільки критерієм зношування більшості інструментів є знос саме по задній поверхні, отримані результати дозволяють у перспективі розробити методики і алгоритми прогнозування періоду стійкості інструментів та розрахунку їх ресурсу роботи.

#### Список використаної літератури:

1. Мазур М.П. Розробка теоретичних основ та практичне використання термомеханічної моделі обробки пластичних матеріалів : дис. ... д.т.н. : 05.03.01 / М.П. Мазур. – К., 1999. – 309 с.
2. Физические основы процесса резания металлов / В.А. Остафьев, И.П. Стабин, В.А. Румбешт и др. ; под общ. ред. В.А. Остафьева. – К. : Вища школа, 1976. – 136 с.
3. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / М.Ф. Полетика. – М. : Машиностроение, 1969. – 150 с.
4. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 278 с.
5. Кабалдин Ю.Г. Расчет износа режущего инструмента на основе структурно-энергетического подхода к его прочности / Ю.Г. Кабалдин, Б.И. Молокалов, В.В. Высоцкий // Вестник машиностроения. – 1993. – № 9. – С. 33–36.
6. Мясущев А.А. Разработка метода расчета контактных нагрузок на режущих поверхностях инструмента со сложной передней поверхностью : дисс. ... д.т.н. : 05.03.01 / А.А. Мясущев. – К., 1994. – 214 с.
7. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластических материалов / В.С. Кушнер. – Иркутск : Изд-во Иркутского ун-та, 1982. – 180 с.
8. Утешев М.Х. Некоторые результаты исследований напряженного состояния режущей части инструмента при помощи лазера / М.Х. Утешев, В.А. Симонов // Прочность режущего инструмента. – М., 1969. – С. 34–39.
9. Зорев Н.Н. Исследование элементов механики процесса резания / Н.Н. Зорев. – М. : Mashgiz, 1952. – 604 с.
10. Филоненко С.Н. Особенности геометрии износа резцов при тонком точении стали 38ХМЮА / С.Н. Филоненко, Г.Ф. Алейниченко // Резание и инструмент. – Харьков, 1971. – Вып. 4. – С. 67–79.
11. Основи теорії різання матеріалів : підручник для вищ. навч. закладів / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, А.І. Грабченко та ін. ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 3-тє вид. перероб. і доп. – Л. : Новий світ-2000, 2018. – 471 с.

#### References:

1. Mazur, M.P. (1999), *Rozrobka teoretychnykh osnov ta praktychne vykorystannja termomehanichnoi' modeli obrobky plastychnykh materialiv*, D.Sc. Thesis of dissertation, 05.03.01, K., 309 p.
2. Ostaf'ev, V.A., Stabin, I.P., Rumbesht, V.A. et al. (1976), *Fizicheskie osnovy protsesssa rezaniya metallov*, in Ostaf'ev, V.A. (ed.), *Vyshha shkola*, K., 136 p.
3. Poletika, M.F. (1969), *Kontaktnye nagruzki na rezhushchikh poverkhnostyakh instrumenta*, Mashinostroenie, M., 150 p.
4. Reznikov, A.N. (1981), *Teplofizika protsessov mekhanicheskoi obrabotki materialov*, Mashinostroenie, M., 278 p.
5. Kabaldin, Yu.G., Molokalov, B.I. and Vysotskii, V.V. (1993), «*Raschet iznosa rezhushchego instrumenta na osnove strukturno-energeticheskogo podkhoda k ego prochnosti*», *Vestnik mashinostroeniya*, No. 9, pp. 33–36.
6. Myasishchev, A.A. (1994), *Razrabotka metoda rascheta kontaknykh nagruzok na rezhushchikh poverkhnostyakh instrumenta so slozhnoi perednei poverkhnost'yu*, D.Sc. Thesis of dissertation, 05.03.01, K., 214 p.
7. Kushner, V.S. (1982), *Termomekhanicheskaya teoriya protsesssa nepreryvnogo rezaniya plasticheskikh materialov*, Izd-vo Irkutskogo un-ta, Irkutsk, 180 p.
8. Uteshev, M.Kh. and Simonov, V.A. (1969), «*Nekotorye rezul'taty issledovaniia napryazhennogo sostoyaniya rezhushchei chasti instrumenta pri pomoshchi lazera*», *Prochnost' rezhushchego instrumenta*, M., pp. 34–39.
9. Zorev, N.N. (1952), *Issledovanie elementov mekhaniki protsesssa rezaniya*, Mashgiz, M., 604 p.

10. Filonenko, S.N. and Aleinichenko, G.F. (1971), «Osobennosti geometrii iznosa reztsov pri tonkom tochenii stali 38KhMYuA», *Rezanie i instrument*, Khar'kov, Issue 4, pp. 67–79.
11. Mazur, M.P., Vnukov, Ju.M., Grabchenko, A.I. et al. (2018), *Osnovy teorii' rizzannja materialiv*, pidruchnyk dlja vyshh. navch. zakladiv, in Mazur, M.P. (ed.), 3-tje vyd. pererob. i dop., Novyj svit-2000, L'viv, 471 p.

**Мазур** Микола Петрович – доктор технічних наук, професор Хмельницького національного університету.

Наукові інтереси:

- моделювання процесу різання матеріалів;
- контактні процеси;
- теплофізика процесу різання.

**Mazur M.P.**

#### **Determining the stress state on the flank surface of a cutting tool**

The work investigates the question of theoretically calculating normal and tangent stresses on the contact area of the flank surface of a cutting tool. The field of stresses is calculated with the finite element method by the means of superposition of the fields of stress from the forces that act on the shear surface, and the stress fields from the elastic recovery of the cutting surface, which is imitated by pressing the «stamp» of the flank surface into the cutting surface until the desired criterion of plasticity is reached. We take into consideration the friction forces, which act on the flank surface of the tool and the strengthening the surface layer of the cutting surface as a result of plastic deformation in the zone of primary plastic deformations. It is established, that the forces which act on the shear surface deform the cutting surface in such a way, that the point, which is most distant from the tip of the flank part of the cutting surface comes in contact first. This results in the rapid increase of stress in that point. At the same time, the shear and moment diagram of the friction stressed depends on the form of the chamfer wear of the flank surface in the contact zone. Any artificially created chamfer results in an artificial shear and moment diagram of the stresses. Computer modelling of the wear process of the flank surface has shown that, during the first several seconds, more intense wear occurs on the flank surface, with a higher stress, after which the stress on the flank surface levels up, extending the stress at the end of the inhibited body of the rake surface. The suggested method and the computer calculation algorithm of the contact stresses in a singular complex, deformation-stress-temperature-wear.

**Keywords:** forces on the shear surfaces; stress field on the flank surface during cutting; friction on the flank surface; chamfer wear; inhibited body.

Стаття надійшла до редакції 29.06.2022.