УДК 621.91 doi: 10.20998/2078-5364.2021.3.04

Хавін Г.Л., д.т.н., професор

ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАКОНУ ЗНОШУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ ПРИ РІЗАННІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: зношування інструменту, абразивний знос, різання композитів, геометрія ріжучої кромки, спадково-старіюча модель закону зношування

Вступ. Постановка задачі

Найважливішою і характерною особливістю механічної обробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) є інтенсивний знос ріжучої кромки інструменту. Цей факт, перш за все, є результатом сукупності фізичних, хімічних і термомеханічних явищ в процесі різання композиту. При цьому за своїм виглядом зношування носить яскраво виражений абразивний характер і повністю відрізняється від зношування при обробці металів.

Безперервний контакт з ковзанням між вершиною інструменту з високою міцністю і неоднорідним матеріалом, значно поступається своїми властивостями міцності, але володіє високими абразивними властивостями, супроводжується вкрай інтенсивним зносом по задній поверхні. Вивченню проблеми абразивного зносу були присвячені численні теоретичні, експериментальні та чисельні дослідження. Перш за все, цікавили питання прогнозування зносу інструмента, що ведуть до погіршення якості обробки виробу.

Як будь-який фізичний процес, зношування в контакті вершина інструменту-ПКМ, повинно підпорядковуватися деякому закону (закон зношування), який описує в часі видалення матеріалу і дозволяє прогнозувати працездатність інструменту (стійкість). Численні теоретичні та експериментальні дослідження показують, що швидкість зносу залежить від різних факторів в процесі взаємодії. До них відносять фізико-хімічні властивості матеріалів взаємодіючих тіл, шорсткість їх поверхонь, наявність мастила, навантажувально-швидкісний режим, температура і склад навколишнього середовища та ін. Всі ці фактори, в тій чи іншій мірі, повинні бути враховані в законі зношування, докладний опис яких можна знайти, наприклад в [1].

У пропонованій статті зроблена спроба обґрунтувати необхідність використання спеціального формулювання закону зношування в контакті вершини інструменту з полімерним композитом, яка дозволяє враховувати специфіку контактної взаємодії, спадковий характер абразивного зносу і зміну форми ріжучої частини інструменту в часі.

Аналіз досліджень і публікацій з проблеми

Аналіз різних досліджень зношування ріжучої кромки інструменту при обробці ПКМ показав, що є жорстка кореляція між появою зносу, зростанням силового навантаження, температурної напруженості і появою різних дефектів обробленої поверхні [2].

Дослідження впливу факторів процесу різання, таких як сили, температура в контакті, зміна виду стружки дозволило сформулювати деякі закономірності зношування інструменту і прогнозувати його стійкість [3,4]. Аналіз наявних експериментальних до-

сліджень [5,6] дав можливість зробити ряд якісних висновків з фізичної суті процесу, що має місце при зношуванні інструменту.

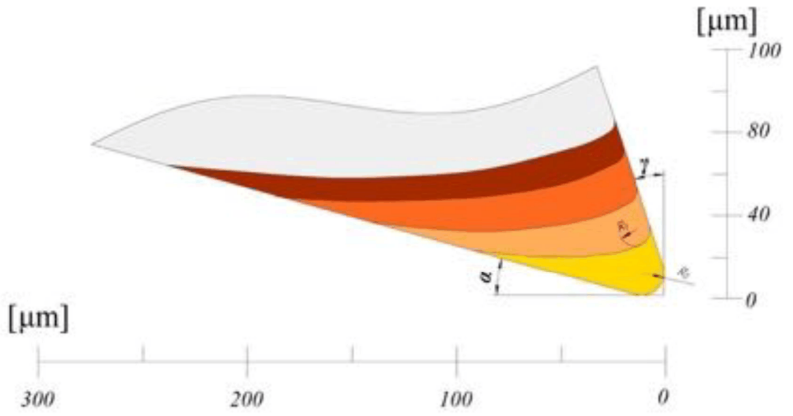

Рисунок 1 – Зміна форми вершини свердла з твердого сплаву в залежності від числа просвердлених отворів [5]

Перш за все, відзначається практично ідентична зміна форми ріжучої кромки, рис. 1. Така форма зносу характерна для інтенсивного видалення матеріалу по задній поверхні інструменту і практично відсутності зносу по передній поверхні [7,8].

Різними авторами були запропоновані моделі на мікрорівні, що описують знос вершини інструменту, як головну складову загального зносу інструменту в цілому. Аналіз цих досліджень зношування ріжучої кромки показав, що є жорстка кореляція між появою зносу, зростанням силового навантаження, температурної напруженості і появою різних дефектів обробленої поверхні [8,9].

Мета роботи. Для абразивного зношування вершини інструменту при механічній обробці ПКМ пропонується подальший розвиток спадково-старіючого закону взаємного зношування в контакті. Це дозволить більш точно описати процес зносу вершини інструменту і прогнозувати його працездатність.

Основна частина. Закон зношування встановлює зв'язок інтенсивності зношування з тиском і швидкістю ковзання індентора для кожної точки поверхні тертя. Форма закону зношування, яка запропонована різними авторами [1], відрізняється достатньою різноманітністю і звичайно припускає явну залежність інтенсивності зносу від часу взаємодії. Головна відмінність математичного формулювання різних законів зношування і, як наслідок, постановок зносоконтактних задач, полягає в можливості врахування впливу тих чи інших фізичних факторів: структури оброблюваного матеріалу, швидкості, температури, умов контакту (мастило, тертя, руйнування) і т.д.

В даний час, незважаючи на численні зусилля дослідників в області механічної обробки композиційних матеріалів, опис зношування інструменту, зміни його мікрогеометрії в процесі роботи і прогнозування його стійкості, носять емпіричний характер і базуються на проведенні конкретних експериментів для окремих матеріалів та інструментів. Теоретичні підходи базуються на використанні співвідношення Арчарда для абразивного зносу. У цьому співвідношенні зношений об’єм матеріалу (відокремлений

об'єм матеріалу) є пропорційним прикладеному контактному зусиллю (контактна сила) і довжині контакту $w = K / 3 \cdot F \cdot l / H$, де w – обсяг зношеного (віддаленого) матеріалу; F – контактна сила; l – довжина контакту; H – твердість більш твердого матеріалу, в даному випадку інструменту; K – коефіцієнт Арчарда. Найчастіше це співвідношення використовують як залежність швидкості зношування dw/dt від контактного тиску і швидкості взаємодії dl/dt. Лінійний характер співвідношення Арчарда коректно виконується досить рідко для окремих видів матеріалу у вузькому діапазоні зміни параметрів взаємодії.

Зміни дії, наприклад, осьової сили F_s в часі з урахуванням зношування (зміни мікрогеометрії вершини інструменту) може бути представлено у вигляді $F_s = K \cdot F^{\alpha} \cdot V^{\beta} \cdot g(w)$, де V – швидкість різання, α і β – експериментальні постійні. Функцію $g\ (w)$ найчастіше представляють в вигляді $g(w) = (w_0 + k_w \cdot w)^{\delta}$ або $g(w) = w_0 + k_w \cdot w^{\delta}$, де k_w і δ – експериментальні постійні [10].

В кінцевому підсумку для опису закону зношування і передбачення стійкості інструменту необхідне знання ряду емпіричних постійних, значення яких визначаються зміною мікрогеометрії вершини інструменту в процесі взаємодії заготовки і матеріалу.

Приймемо, що знос носить абразивний характер, тобто більш твердий матеріал видаляє за рахунок різання або розколювання інший, менш твердий. Це припущення підтверджено численними експериментальними дослідженнями багатьох авторів.

Для повного аналітичного уявлення завдання необхідно керуватися законом абразивного зношування, який пропонується у вигляді швидкості зміни об'єму матеріалу вершини інструменту в часі (щільність вважається постійною)

$$\frac{dv(t)}{dt} = K_{wear} \cdot \frac{\mu \cdot F_n}{[\tau_{sh}]} \cdot \frac{HV_{fill}}{HV_{tool}} \cdot V \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}}, \qquad (1)$$

де dv/dt – швидкість видалення обсягу матеріалу вершини інструменту, м^3/с, F_n – нормальна складова сили різання в контакті (може бути визначена експериментально), Н; μ – коефіцієнт тертя в контакті; $[\tau_{sh}]$ – допустиме напруження зсуву матеріалу наповнювача, Н/м^2; HV_{fill}, HV_{tool} – твердість матеріалу наповнювача (армуючого елемента) і матеріалу ріжучого інструменту, Н/м^2; V – відносна швидкість ковзання (руху вершини інструменту), м/с; Q – енергія активації, Дж/моль; R – універсальна газова постійна, Дж/(моль·° С); T – температура в зоні різання, °К; t – час, с; K_{wear} – коефіцієнт об'ємного зносу, який визначає форму та інтенсивність зносу поверхні інструменту в часі.

У представленому співвідношенні перевагу віддано безпосередньо параметру часу, а не якомусь іншому параметру, наприклад, кількості просвердлених отворів. Це більш загальний підхід так, як враховується безпосередньо час роботи інструменту незалежно від виду операції та кількісного еквівалента кожної операції, яку він здійснює.

Сила F_n, нормальна складова інтегральної сили, що має місце на задній поверхні інструменту, в загальному випадку є функція технологічних параметрів обробки – подачі *s*, м/хв. або мм/об; частоти обертання шпинделя *f*, об/хв.; глибини різання δ, мм; конструктивного виконання інструменту; накопиченого зносу і взаємного розташування напрямку обробки і напрямку армування композиту. В даний час накопичено достатньо багато експериментальних даних по емпіричному визначенню сил різання різних

композитів і аналітичних моделей, що дозволяють підрахувати цю силу [11,12]. Отже, в загальному випадку, ця сила нелінійно залежить від часу роботи інструменту через мінливі геометричні параметри інструменту внаслідок його зносу і зміни технологічних параметрів обробки виробу з часом.

Враховування такого фізичного ефекту як тертя і визначення коефіцієнтів тертя в математичних моделях контактного взаємодії композитів з матеріалом інструменту найістотнішим чином відрізняється від визначення тертя при обробці однорідних матеріалів. Неоднорідність структури і анізотропія властивостей композитів унеможливлюють застосування класичної теорії контакту. Коефіцієнт тертя, крім ювенільної поверхні контакту, також визначається присутністю продуктів руйнування сполучного і наповнювача в контакті при досить високій температурі. В результаті чого контактна взаємодія відбувається через реально існуючий пружно-пористий або в'язкопружній шар за рахунок розплавленого сполучного.

Побудова моделі контактної взаємодії, розпочате наприклад в [13], між тілами, одне з яких представляє композит, дозволило зробити висновок, що коефіцієнт тертя головним чином впливає на величину зони контакту. Однак більшість досліджень не дає відповіді на головне питання – яка це величина і як змінюється в процесі контактної взаємодії (обробки виробу).

У даній роботі припускається, що величина коефіцієнта тертя залежить від наступних факторів. Перш за все, орієнтації наповнювача в композиті і його загальної кількості, а також температури в зоні контактної взаємодії і швидкості ковзання. Вивчення характеру і величини коефіцієнта тертя в контакті інструмент-зрізуємий шар композиту є окремою і вкрай складною задачею. В якості першого наближення коефіцієнта тертя прийнята постійна величина, що незалежна від часу.

Коефіцієнт K_{wear} є функцією часу роботи інструменту. Він повинен, перш за все, відображати той факт, що взаємодіюча пара «інструмент-заготовка» з часом повинна як би забувати про етап приробляння, який має високу швидкість зношування. Крім того, необхідно відобразити також факт того, що залежність зносу від навантаження (контактного тиску) характеризується наявністю післядії. Практична реалізація такого підходу була запропонована в роботі [14].

Після деякого періоду роботи інструмент повністю не зносився і ще може бути використаний, але його форма вже відрізняється від початкової, загостреної форми. Цю обставину необхідно враховувати при розрахунку фізичних, технологічних і постійних величин в співвідношенні (1).

Для забезпечення вимог про реалізацію стаціонарного зносу по закінченню певного інтервалу роботи інструменту (приробітку) і наявності післядії коефіцієнт зношування пропонується представити у вигляді добутку трьох співмножників

$$K_{wear} = K_v \cdot K_{ag} \cdot K_h \ ,$$

де $K_{ag}(t) = 1 + k_{ag} \cdot e^{-n_{ag} \cdot t/t_0}$. Звідки випливає, що зі збільшенням часу роботи (контактної взаємодії) цей коефіцієнт прагне до 1, тобто в межі при $t \to \infty$ $K_{ag} \to 1$. Постійні коефіцієнти визначають тривалість етапу приробітки інструменту – n_{ag} і його форму – k_{ag}. Для коефіцієнта K_h пропонується представлення у вигляді $K_h = e^{-n_h \cdot (t_0 - t)/t_0}$, яке відображає той факт, що залежність зносу від контактного тиску характеризується наявністю післядії і таке уявлення описує обмежену величину зносу, що характерно для ін-

струментів при обробці полімерних композитів. Постійні коефіцієнти мають фізичний зміст планованого часу роботи інструменту в робочому стані – t_0, n_h – також визначає форму етапу підробітки, як і k_{ag}.

Зі збільшенням часу роботи інструменту після етапу приробітки настає період (етап) сталого зношування, що характеризується постійною швидкістю зношування, яка має свою асимптоту. Коефіцієнт K_v визначає кут нахилу цієї асимптоти. Цей коефіцієнт принципово може залежати від величини контактного тиску і швидкості взаємодії матеріалу і інструменту при різанні, тобто може змінюватися за межами деякого діапазону швидкостей і тисків. Слід очікувати, що найбільш суттєві зміни матимуть місце при малих швидкостях і тисках, або при високих значеннях цих параметрів.

Робота інструменту дуже часто носить дискретний характер, тобто супроводжується перервами в його роботі, коли кожне наступне його застосування характеризується використанням інструменту з уже частково зношеною ріжучою частиною. Фактично це означає зміну (збільшення) зони контакту, що пропонується враховувати модифікацією коефіцієнта K_{ag} виду

$$K_{ag}(t) = 1 + k_{ag} \cdot e^{-n_{ag} \cdot (t - t_{ac})/t_0},$$

де t_{ac} – акумульований час роботи інструменту.

З огляду на викладене вище, співвідношення, яке описує величину об'ємного зношування вершини інструменту в будь-який момент часу, може бути представлено у вигляді

$$\int_{t_{ac}}^{t_0} dv(t) = \int_{t_{ac}}^{t_0} K_v \cdot \left[1 + k_{ag} \cdot e^{-n_{ag} \cdot (t - t_{ac})/t_0} \right] \cdot \left[e^{-n_h \cdot (t_0 - t)/t_0} \right] \times$$
$$\times \frac{\mu(t) \cdot F_n(t)}{[\tau_{sh}]} \cdot \frac{HV_{fill}}{HV_{tool}} \cdot V(t) \cdot e^{-\frac{Q(t)}{R \cdot T(t)}} dt.$$

Або спростивши модель, поклавши коефіцієнт тертя μ, зусилля різання F_n, відносну швидкість ковзання V, енергію активації Q і температуру T в зоні різання постійними величинами, незалежними від часу взаємодії (зносу) отримаємо

$$v(t_0) - v(t_{ac}) = K_v \cdot \frac{\mu(t_{av}) \cdot F_n(t_{av})}{[\tau_{sh}]} \cdot \frac{HV_{fill}}{HV_{tool}} \cdot V(t_{av}) \cdot e^{-\frac{Q(t_{av})}{R \cdot T(t_{av})}} \cdot$$
$$\int_{t_{ac}}^{t_0} \left[1 + k_{ag} \cdot e^{-n_{ag} \cdot (t - t_{ac})/t_0} \right] \cdot \left[e^{-n_h \cdot (t_0 - t)/t_0} \right] \cdot dt, \quad (2)$$

де для μ, F_n, V, Q та T беруться їх деякі середні значення $\mu(t_{av})$, $F_n(t_{av})$, $V(t_{av})$, $Q(t_{ac})$, $T(t_{ac})$. Якщо прийняти постійної ширину ріжучої кромки інструменту, тоді співвідношення (2) можна представити у вигляді

$$\left[w(t_0) - w(t_{ac})\right] \cdot b_w = K_s \cdot \int_{t_{ac}}^{t_0} \left[1 + k_{ag} \cdot e^{-n_{ag} \cdot (t - t_{ac})/t_0} \right] \cdot \left[e^{-n_h \cdot (t_0 - t)/t_0} \right] \cdot dt ,$$

де $w(t_0)$ і $w(t_{ac})$ – площа зношеної поверхні в кінцевий і початковий період часу; коефіцієнт K_v містить

$$K_s = K_v \cdot \frac{\mu(t_{av}) \cdot F_n(t_{av})}{\left[\tau_{sh}\right]} \cdot \frac{HV_{fill}}{HV_{tool}} \cdot V(t_{av}) \cdot e^{-\frac{Q(t_{av})}{R \cdot T(t_{av})}} .$$

Без обмежень на загальність міркувань приймемо, що початковий накопичений знос $w(t_{ac})$ дорівнює нулю, тоді

$$w(t_0) = K_s / b_w \cdot \int_0^{t_0} \left[1 + k_{ag} \cdot e^{-n_{ag} \cdot t/t_0} \right] \cdot \left[e^{-n_h \cdot (t_0 - t)/t_0} \right] \cdot dt .$$

Після інтегрування одержимо

$$w(t_0) = K_s / b_w \cdot \left[(1 + k_{ag}) \cdot t_0 \cdot e^{-n_h} + \frac{t_0}{n_h} \cdot (e^{n_h} - 1) + \frac{k_{ag} \cdot t_0}{n_h - n_{ag}} \left(e^{n_h - n_{ag}} - 1 \right) \right]$$

Висновок. Надано одне з можливих формулювань закону зношування для опису абразивного зносу вершини ріжучого інструменту при механічній обробці полімерних композиційних матеріалів. Прийнято, що закон зношування носить спадковий характер і має місце лінійна залежність швидкості зношування від швидкості контактної взаємодії та тиску. Напруження зрізу через контактний тиск і коефіцієнт тертя нелінійно залежать від часу роботи інструменту із-за зміни внаслідок зносу геометричних розмірів інструменту і технологічних параметрів обробки виробу.

Численні експериментальні дослідження в області механічної обробки композиційних матеріалів для окремих матеріалів та інструментів, дозволили сформулювати приватні моделі для опису зношування інструменту, зміни його мікрогеометрії в процесі роботи і прогнозування його стійкості.

Для вимірювання поточного зносу і перерахунку в математичних моделях існують значні складності так, як вони включають в себе велику кількість параметрів. Це ускладнює проведення простого технічного контролю зносу ріжучої кромки і передбачення стійкості інструменту.

Зміна геометрії інструменту внаслідок зносу має описуватися простою однопараметричною геометричною моделлю, що дозволяє оцінити спотворення форми ріжучої кромки по задній поверхні інструменту. В якості головного критерію вимірювання зношування інструменту використовувати втрату їм ваги в процесі різання. Створення такої математичної моделі має спиратися на використання адекватного закону зношування, що в сукупності являє собою перспективний напрямок наукових досліджень, володіє новизною і практичною цінністю, і отримає свій подальший розвиток.

Література

1. Солдатенков И.А. Износоконтактная задача с приложениями к инженерному расчету износа. М.: Физматкнига, 2010. 160 с.

2. Хавин Г.Л., Чживень Х. Моделирование микрогеометрии инструмента в процессе его изнашивания при резании композиционных материалов // Різання та інструмент в технологічних системах. 2020. 92. С. 208–224.

3. Abellan-Nebot J, Subiron F. A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models // Int. J. Adv. Manuf. Technology. 2010. 47. P. 37–57.

4. Leone C., D'Addona D., Teti R. Tool wear modeling through regression analysis and intelligent methods for nickel base alloy machining // CIRP Ann– Manuf. Technology. 2011. 60. N 4. P. 327–331.

5. Hrechuk A., Bushlya V., Saoubi M.R., etc. Experimental investigations into tool wear of drilling CFRP // Procedia Manufacturing. 2018. 25. P. 294–301.

6. Ramireza C., Poulachona G., Rossia F., etc. Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling // Procedia CIRP. 2014. N13. P. 163–168.

7. Faraz A., Biermann D., Weinert K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2009. 49. N15. P. 1185–1196.

8. Seeholzer L., Voss R., Grossenbacher F., etc. Fundamental analysis of the cutting edge micro-geometry in orthogonal machining of the unidirectional Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP) // Procedia CIRP. 2018. 7. P. 379–382.

9. Voss R., Henerichs M., Capricano G., etc. Post-Coating Treatment of Cutting Edge for Drilling Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP) // Procedia CIRP. 2016. 46. P. 161–164.

10. Iliescu D., Gehin D., Gutierrez M.E., etc. Modeling and tool wear in drilling of CFRP // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2010. 50. P. 204–213.

11. Sheikh-Ahmad J.Y. Machining of Polymer Composites, Springer, 2009.

12. Kalla D., Sheik-Ahmad J., Twomey J. Prediction of Cutting Forces in Helical End Milling Fiber Reinforced Polymers // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2010. 50. P. 882–891.

13. Ning X., Lovell M.R. On the sliding friction characteristics of unidirectional continuous FRP composites // Journal of tribology. 2002. 124(1). P. 5–13.

14. Гавриков М.В., Мазинг Р.И. Применение наследственно-стареющей модели изнашивания осесимметричной контактной задаче // Трение и износ. 1989. 6. С. 981–986.

Bibliography (transliterated)

1. Soldatenkov I.A. Iznosokontaktnaya zadacha s prilozheniyami k inzhenernomu raschetu iznosa. M.: Fizmatkniga, 2010. 160 p.

2. Khavin G.L., Chzhiven' KH. Modelirovanie mikrogeometrii instrumenta v processe ego iznashivaniya pri rezanii kompozicionnykh materialov // Rizannya ta in-strument v tekhnologichnikh sistemakh. 2020. 92. P. 208–224.

3. Abellan-Nebot J, Subiron F. A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models // Int. J. Adv. Manuf. Technology. 2010. 47. P. 37–57.

4. Leone C., D'Addona D., Teti R. Tool wear modeling through regression analysis and intelligent methods for nickel base alloy machining // CIRP Ann– Manuf. Technology. 2011. 60. N 4. P. 327–331.

5. Hrechuk A., Bushlya V., Saoubi M.R., etc. Experimental investigations into tool wear of drilling CFRP // Procedia Manufacturing. 2018. 25. P. 294–301.

6. Ramireza C., Poulachona G., Rossia F., etc. Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling // Procedia CIRP. 2014. N13. P. 163–168.

7. Faraz A., Biermann D., Weinert K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2009. 49. N15. P. 1185–1196.

8. Seeholzer L., Voss R., Grossenbacher F., etc. Fundamental analysis of the cutting edge micro-geometry in orthogonal machining of the unidirectional Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP) // Procedia CIRP. 2018. 7. P. 379–382.

9. Voss R., Henerichs M., Capricano G., etc. Post-Coating Treatment of Cutting Edge for Drilling Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP) // Procedia CIRP. 2016. 46. P. 161–164.

10. Iliescu D., Gehin D., Gutierrez M.E., etc. Modeling and tool wear in drilling of CFRP // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2010. 50. P. 204–213.

11. Sheikh-Ahmad J.Y. Machining of Polymer Composites, Springer, 2009.

12. Kalla D., Sheik-Ahmad J., Twomey J. Prediction of Cutting Forces in Helical End Milling Fiber Reinforced Polymers // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2010. 50. P. 882–891.

13. Ning X., Lovell M.R. On the sliding friction characteristics of unidirectional continuous FRP composites // Journal of tribology. 2002. 124(1). P. 5–13.

14. Gavrikov M.V., Mazing R.I. Primenenie nasledstvenno-stareyushchej modeli iznashivaniya osesimmetrichnoj kontaktnoj zadache // Trenie i iznos. 1989. 6. P. 981–986.

УДК 66.045.53

Хавін Г.Л., д.т.н., професор

ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАКОНУ ЗНОШУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ ПРИ РІЗАННІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Численні експериментальні дослідження в області механічної обробки композиційних матеріалів для окремих матеріалів та інструментів, дозволили сформулювати приватні моделі для опису зношування інструменту, зміни його мікрогеометрії в процесі роботи і прогнозування стійкості. Для вимірювання поточного зносу і перерахунку в математичних моделях існують значні складності так, як вони включають в себе велику кількість параметрів. Це не дозволяє створювати простий технічний контроль зносу ріжучої кромки і передбачення стійкості інструменту. Надане формулювання ізносоконтактної задачі взаємодії вершини інструменту і матеріалу при точінні армованих композиційних пластиків. Ґрунтуючись на відомих дослідженнях, прийнято, що зношування має місце по задній поверхні інструменту, і супроводжується несиметричним зносом його вершини. Розглядається модель абразивного зношування при ковзанні задньої поверхні вершини інструменту з матеріалом армування полімерного композиту і продуктами руйнування. Передбачається, що закон зношування носить спадковий характер і

має місце лінійна залежність швидкості зношування від швидкості контактної взаємодії та контактного тиску. Напруги зрізу через контактний тиск і коефіцієнт тертя нелінійно залежать від часу роботи інструменту через зміну внаслідок зносу геометричної форми інструменту і технологічних параметрів обробки виробу з часом. Введений коефіцієнт об'ємного зносу є функцією часу роботи інструменту. Він відбиває той факт, що взаємодія пари «інструмент-заготовка» з часом повинна як би забувати про етап приробітки, який має високу швидкість зношування і той факт, що залежність зносу від навантаження (контактного тиску) характеризується наявністю післядії. Одержано спрощене співвідношення закону зносу в припущенні відсутності зміни коефіцієнта тертя, температури і контактного тиску в часі. В кінцевому підсумку для опису закону зношування і передбачення стійкості інструменту необхідне знання ряду емпіричних постійних, значення яких визначаються зміною мікрогеометрії вершини інструменту в процесі взаємодії при обробці різанням.

Ключові слова: зношування інструменту; абразивний знос; різання композитів; геометрія ріжучої кромки; спадково-старіюча модель; закон зношування.

Хавин Г.Л., д.т.н., профессор

ФОРМУЛИРОВКА ЗАКОНА ИЗНАШИВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ РЕЗАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Многочисленные экспериментальные исследования в области механической обработки композиционных материалов для отдельных материалов и инструментов, позволили сформулировать частные модели для описания износа инструмента, изменения его микрогеометрии в процессе работы и прогнозирования стойкости. Для измерения текущего износа и пересчета в математических моделях существуют значительные сложности так, как они включают в себя большое количество параметров. Это не позволяет осуществлять простой технический контроль износа режущей кромки и предсказания стойкости инструмента. Представлена формулировка износоконтактной задачи взаимодействия вершины инструмента и материала при точении армированных композиционных пластиков. Основываясь на известных исследованиях, принято, что износ имеет место по задней поверхности инструмента, и сопровождается несимметричным изменением геометрии его вершины. Рассматривается модель абразивного износа при скольжении задней поверхности вершины инструмента с материалом армирования полимерного композита и продуктами разрушения. Предполагается, что закон изнашивания носит наследственный характер и имеет место линейная зависимость скорости износа от скорости контактного взаимодействия и давления. Напряжения среза через контактное давление и коэффициент трения нелинейно зависят от времени работы инструмента из-за изменения вследствие износа геометрической формы инструмента и технологических параметров обработки изделия со временем. Коэффициент объемного износа является функцией времени работы инструмента. Он отражает тот факт, что взаимодействие пары «инструмент-заготовка» со временем должно как бы забывать об этапе приработки, который имеет высокую скорость износа и тот факт, что зависимость износа от нагрузки (контактного давления) характеризуется наличием последействия. Получено упрощенное соотношение закона износа в предположении отсутствия изменения коэффициента трения, температуры и контактного давления во времени. В конечном итоге для описания закона износа и предсказания стойкости инструмента не-

обходимо знание ряда эмпирических постоянных, значения которых определяются изменением микрогеометрии вершины инструмента в процессе взаимодействия при обработке резанием.

Ключевые слова: износ инструмента; абразивный износ; резки композитов; геометрия режущей кромки; наследственно-стареющая модель; закон износа.

Khavin G.L.

FORMULATION OF TOOL WEAR LAW WHEN CUTTING POLYMER COMPOSITES

Numerous experimental studies in the field of mechanical processing of composite materials for individual materials and tools made it possible to formulate particular models for describing tool wear, changing its microgeometry during operation and predicting durability. There are significant difficulties in measuring current wear and recalculation in mathematical models, since they include a large number of parameters. This does not allow for simple technical control of cutting edge wear and predicting tool life. The formulation of the wear-contact problem of the tool tip and the material interaction during turning of reinforced composite plastics is presented. Based on known studies, it is assumed that wear occurs along the flank of the tool, and is accompanied by an asymmetric change in the geometry of its tip. A model of abrasive wear during sliding of a tool tip rear surface with a polymer composite reinforcement material and fracture products is considered. It is assumed that the wear law is hereditary and there is a linear dependence of the wear rate on the rate of contact interaction and pressure. Shear stresses through the contact pressure and the coefficient of friction nonlinearly depend on the operating time of the tool due to the change due to wear in the geometric shape of the tool and the processing parameters of the product over time. The volumetric wear factor is a tool run time function. It reflects the fact that the interaction of the “tool-workpiece” pair with time should, as it were, forget about the running-in stage, which has a high wear rate, and the fact that the dependence of wear on the load (contact pressure) is characterized by the presence of aftereffect. A simplified relationship is obtained for the wear law under the assumption that there is no change in the coefficient of friction, temperature and contact pressure over time. Ultimately, to describe the wear law and predict the tool life, it is necessary to know a number of empirical constants, the values of which are determined by the change in the microgeometry of the tool tip during interaction during cutting.

Keywords: tool wear; abrasive wear; cutting composites; cutting edge geometry; hereditarily aging model; law of wear.