

УДК 621.914.014

doi: 10.32620/aktt.2022.2.04

О. М. ГНИТЬКО, А. В. КУЗНЕЦОВА

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний університет», Україна

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ФРЕЗЕРУВАННЯ ПРОФІЛЬНИХ ПАЗІВ ЗА РАХУНОК УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ВИДАЛЕННЯ СТРУЖКИ

До числа ефективних, але недостатньо використовуваних у цей час резервів удосконалення системи примусового видалення стружки, відноситься значний енергетичний потенціал мастильно-охолодженого технологічного засобу, що подається в зону різання для змащення та охолодження різального інструменту. Однією із причин такого положення є відсутність цільної концепції удосконалення системи видалення стружки, а також практична невивченість закономірностей їх робочих процесів при здійсненні примусового впливу на відділену стружку саме при обробці профільних пазів. Наведене свідчить про актуальність і важливість для машинобудування України задачі створення високопродуктивних систем примусового видалення стружки для операцій фрезерування профільних пазів на основі розробки теорії їх функціонування. У результаті виконаних досліджень вирішена важлива задача, яка полягає в підвищенні продуктивності фрезерування профільних пазів за рахунок застосування системи примусового видалення стружки з раціональними параметрами. Розроблені технічні рішення для системи видалення стружки, які забезпечують підвищення продуктивності фрезерування профільних пазів. Розроблене системне представлення процесу примусового видалення стружки при фрезеруванні профільних пазів, що дозволило виділити необхідну кількість математичних моделей. Розроблені частинні та інтегральна математичні моделі функціонування основних підсистем і модулів системи примусового видалення стружки. Виконане моделювання процесу примусового видалення стружки. На підставі моделювання розроблена методика визначення раціональних параметрів системи примусового видалення стружки при фрезеруванні профільних пазів. Виконані експериментальні дослідження, спрямовані на визначення ефективності запропонованих технічних рішень і підтвердження адекватності розроблених математичних моделей. Створена система видалення стружки забезпечує підвищення продуктивності фрезерування профільних пазів приблизно в 2 рази при збереженні якості поверхонь і підвищенні стійкості різального інструменту на величину не менш ніж у 3 рази за рахунок застосування системи примусового видалення стружки з раціональними параметрами.

Ключові слова: стружка; фрезерування профільних пазів; система примусового видалення стружки; частинні та інтегральна математичні моделі; підвищення продуктивності фрезерування; якість поверхонь; стійкість різального інструменту; методика визначення раціональних параметрів.

Вступ

Фрезерування закритих і напівзакритих пазів різних профілів (Т-подібних, типу «ластівчин хвіст», прямокутних і ін.), що є досить нетехнологічними елементами конструкцій, становить істотну частину загального обсягу металообробки. За виконаною оцінкою, ця частина становить в Україні – близько 4,5 км у рік, а у світі – близько 900 км.

Значний обсяг і висока трудомісткість технологічних операцій фрезерування пазів визначає актуальність завдання підвищення їх продуктивності.

Істотним резервом підвищення продуктивності в цьому випадку є усунення обмеження по факторі несвоєчасного видалення стружки із зони обробки. Не евакуйована вчасно стружка досить швидко заповнює паз, що утворюється (у силу його замкнуто-

сті) і повторно затягується обертовим інструментом у зону різання (циркулює). Цей процес супроводжується повторним різанням стружки [1], що приводить до зниження продуктивності і якості обробки.

Одним з можливих шляхів усунення цього обмеження є примусове видалення стружки за допомогою спеціальних пристроїв, зокрема пристроїв, що використовують гідродинамічний потенціал напірних струменів рідини, водо-повітряної суміші і т.д. На рис. 1 представлено одне із запропонованих технічних рішень [2].

У той же час, у відомих роботах у цій області [3, 4 і ін.] процеси заповнення, циркуляції й видалення стружки із закритих профільних пазів і їх моделювання практично не розглядаються. Тому дослідження, спрямовані на вивчення цих процесів, є актуальними.

Основна частина

Для створення високоефективних зразків пристроїв, що забезпечують примусове видалення стружки при фрезеруванні закритих профільних пазів, виконаний комплекс теоретичних і експериментальних досліджень.

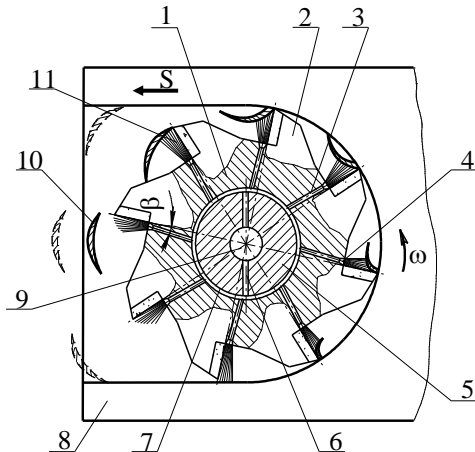


Рис. 1. Фреза для обробки Т-подібних пазів:

- 1 – корпус; 2 – зуб; 3 – канал у корпусі фрези;
4 – насадок; 5 – оправка; 6 – радіальний канал;
7 – кільцева проточка; 8 – оброблювана заготовка;
9 – осьовий канал; 10 – елемент стружки;
11 – струмінь робочої суміші

З використанням методології системного підходу й прийнятих допущень [5] розроблено 6 математичних моделей (ММ), що описують різні етапи процесу функціонування пристроїв видалення стружки.

1. Для дослідження заповнення стружкою простору між зубцями фрези в процесі різання розроблена математична модель ММ1, що дозволяє визначити кількість обертів фрези N , відповідне до повного заповнення простору між зубцями.

Кінцева залежність моделі має вигляд

$$N = \frac{\frac{1}{3} \left[\frac{hl[z + (z + 2(l \tan \omega_n))]}{2} + \sqrt{\frac{zh^2[z + 2(l \tan \omega_n)]}{4}} \right]}{S_z(d-a) \cdot l \cdot k_p}, \quad (1)$$

де N – кількість обертів фрези;

S_z – подача на зуб фрези;

d – діаметр фрези;

a – ширина попередньо обробленого паза;

l – висота ріжучої частини фрези;

k_p – коефіцієнт розпушення стружки;

h_1 – довжина передньої поверхні зуба фрези;

$$z = h_1 \tan \beta_n;$$

β_n – кут між передньою поверхнею зуба фрези й поверхнею потилиці наступного зуба;

ω_n – кут підйому гвинтової канавки фрези.

Виконаний аналіз дозволив установити, що заповнення простору між зубцями фрези відбувається досить швидко, у середньому за 2-5 обертів.

2. Для дослідження переміщення елемента стружки уздовж передньої поверхні зуба фрези під дією інерційних сил і гідродинамічної сили примусового впливу розроблена математична модель ММ2 [5], що дозволяє визначити миттєві значення швидкості v_1 переміщення елемента стружки в результаті інерційного й (або) примусового впливу на нього в межах інструмента (фрези).

Кінцеві залежності моделі мають вигляд

$$v_1 = \alpha_1 \cdot C_1 \cdot e^{\alpha_1 \cdot t} + \alpha_2 \cdot C_2 \cdot e^{\alpha_2 \cdot t}, \quad (2)$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 - 4B}}{2}, \quad (3)$$

$$C_1 = -\frac{D \cdot \alpha_2}{B \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)}, C_2 = \frac{D \cdot \alpha_1}{B \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)}, \quad (4)$$

$$A = 2\omega \cdot f_n, B = -\omega^2 \cos \alpha \cdot (\cos \delta - \sin \delta \cdot f_n), \quad (5)$$

$$D = (2F_{np} / \rho_c \cdot S_z(d-a) \cdot l) \times \\ \times (\cos \beta - \sin \beta \cdot f_n) - g \cdot f_n (1 + \sin \alpha + f_n) + \\ + \omega^2 \left[r_{фр} - (h_1 - \sqrt[3]{3(S_z(d-a) \cdot l) / \pi / 2}) \cos \alpha \right] \times \\ \times (\cos \delta - \sin \delta \cdot f_n), \quad (6)$$

де t – час переміщення елемента стружки уздовж передньої поверхні зуба фрези;

ω – кутова швидкість елемента стружки в переносному обертвовому русі;

f_n – коефіцієнт тертя елемента стружки по передній поверхні зуба фрези;

α – передній кут зуба фрези;

δ – кут нахилу вектора відцентрової сили інерції;

F_{np} – сила примусового впливу на елемент стружки;

β – кут нахилу вектора сили F_{np} до передньої поверхні зуба фрези;

ρ_c – щільність елемента стружки;

g – прискорення вільного падіння;

f_n – коефіцієнт тертя елемента стружки по нижній поверхні паза;

$r_{фр}$ – радіус фрези.

Виконаний за допомогою цієї моделі аналіз дозволив установити, що при обробці сталей і чавунів у рекомендованому діапазоні геометричних параметрів і режимів [6, 7] в 30...100 % випадків відсутня можливість самовидалення елементів стружки за рахунок сил інерції ($v_1 < 0$).

3. Для дослідження переміщення елемента стружки уздовж паза під дією гідродинамічної сили примусового впливу розроблена математична модель ММЗ [8], що дозволяє визначати відстань X , на яке переміщається елемент стружки в результаті примусового впливу на нього за межами фрези струменя робочої рідини.

Кінцева залежність моделі має вигляд

$$X = \frac{m \cdot \rho_0^2 \cdot h^2 \cdot Q_n^2}{2 \cdot F_n \cdot \left(\frac{\rho_0 \cdot \pi \cdot d_0^2 \cdot h}{4} + m \right)^2}, \quad (7)$$

де m – маса елемента стружки;

ρ_0 – щільність рідини;

h – довжина струменя;

Q_n – витрата рідини;

F_n – сила тертя по нижній поверхні паза;

d_0 – діаметр отвору насадка.

4. Технологічні операції фрезерування Т-подібних пазів структурно звичайно складаються із двох переходів – попередньої обробки (фрезерування прямокутного паза дисковою або кінцевою фрезою) і остаточної обробки (фрезерування Т-подібною фрезою). При обробці Т-подібною фрезою відділена стружка розташовується по обидва боки фрези – у прямокутному пазу (рис. 2, а) і в одержуваному Т-подібному (рис. 2, б).

Для дослідження процесу заповнення стружкою простору пазів розроблена математична модель ММ4 [9], що дозволяє встановлювати момент заповнення кожного із зазначених пазів.

А. Для прямокутного паза (рис. 2, а)

$$L_1 = \frac{m v_{в1}^2}{2 \cdot F_n}, \quad (8)$$

де L_1 – довжина обробки Т-подібною фрезою, відповідна до заповнення прямокутного паза стружкою;

$v_{в1}$ – швидкість елемента стружки на виході із простору між зубцями.

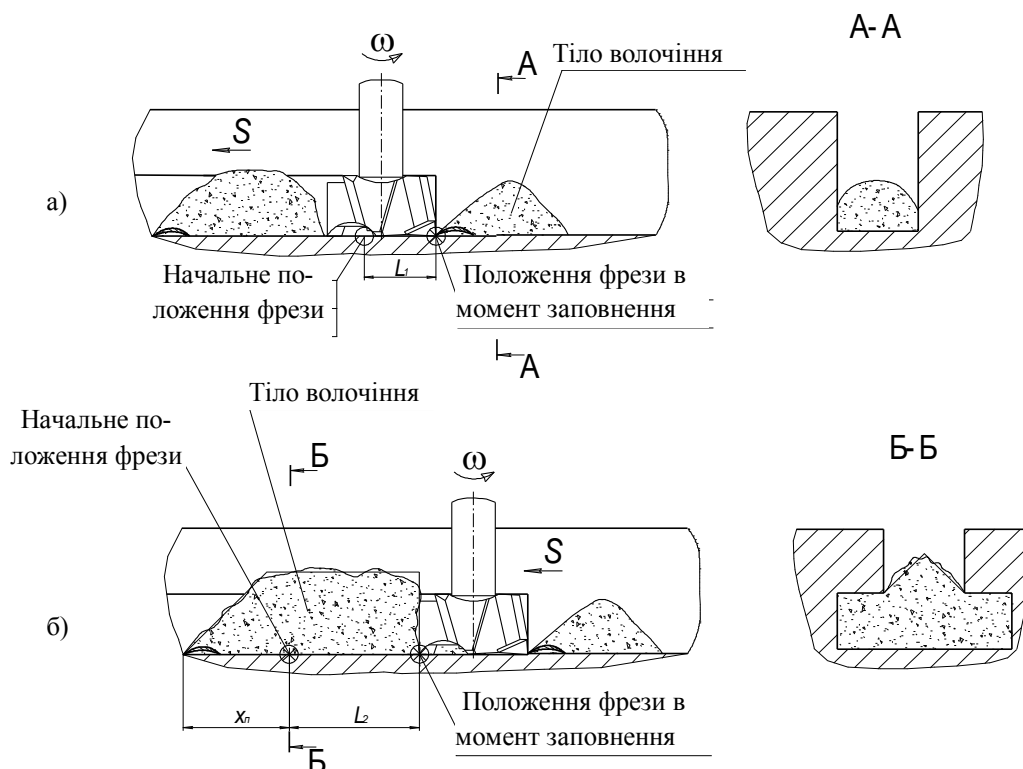


Рис. 2. Схема заповнення стружкою пазів при їх фрезеруванні:
а) – прямокутного паза; б) – Т-подібного паза

Б. Для Т-подібного паза (рис. 2, б)

$$L_2 = \left(\left[\left(x_{\text{п}} + \frac{d}{2} - \frac{\pi d}{8} \right) - c \tan \frac{\varepsilon}{2} \right] dc + \right. \\ \left. + \frac{a^2}{4} \left[\cot \varepsilon \left(x_{\text{п}} - \frac{a}{2} \right) - c \right] + \cot \varepsilon \cdot \frac{a^3}{16} \right) / \\ / (d-a) \cdot k_p - (d \cdot c + \cot \varepsilon \cdot \frac{a^2}{4}), \quad (9)$$

де L_2 – довжина обробки, відповідна до заповнення Т-подібного паза стружкою;

$x_{\text{п}}$ – відстань, на яку переміщується елемент стружки за межами фрези під дією інерційних сил;

c – висота Т-подібного паза;

ε – кут природнього укусу насипного масиву стружки.

Виконаний аналіз дозволив установити, що стружка заповнює простір кожного з пазів через 10 – 30 мм обробки.

5. У випадку несвоєчасного видалення елементів стружки з них формуються тіла волочіння значної довжини (рис. 2).

Для визначення потрібного значення сили примусового впливу на тіло волочіння для його переміщення розроблена математична модель ММ5 [10].

Кінцева залежність ММ5 має вигляд

$$F_{\text{пр}} = \frac{f \cdot \rho \cdot g \cdot L_T}{\cos \gamma} [d \cdot c + 2f \cdot n_6 \times \\ \times \left(\frac{2f \cdot n_6 \cdot c + f \cdot n_6 \cdot d - f \cdot n_6 \cdot d_k}{c \cdot d} \right)^{-1}] \times \\ \times (e^{(2f \cdot n_6 \cdot L_T \cdot d^{-1} + f \cdot n_6 \cdot L_T \cdot c^{-1} - f \cdot n_6 \cdot d_k \cdot L_T \cdot c^{-1} \cdot d^{-1})} - 1) \times \\ \times [c + 0,5(d - d_k)], \quad (10)$$

де f – коефіцієнт опору переміщенню стружки по пазові;

ρ – щільність стружки;

L_T – довжина тіла волочіння;

γ – кут вектора сили примусового впливу;

n_6 – коефіцієнт бічного тиску;

d_k – діаметр кінцевої фрези (або ширина дискової фрези), використовуваної для попередньої обробки паза.

Виконаний аналіз дозволив установити, що $F_{\text{пр}}$ зростає нелінійно – так, при збільшенні довжини тіла волочіння в 2 рази значення $F_{\text{пр}}$ зростає майже в 10 раз.

На основі наведених моделей розроблена методика визначення раціональних параметрів пристроїв примусового видалення стружки.

В умовах спеціально створеного стенда виконані експериментальні дослідження, що дозволили підтвердити адекватність розроблених математичних моделей і ефективність запропонованих техніч-

них рішень.

На рис. 3 як приклад представлено експериментально отримані залежності складової сили різання P_v як функції подачі на зуб фрези S_z при обробці Т-подібного паза.

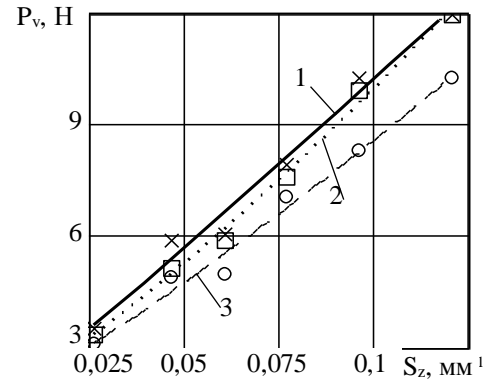


Рис. 3. Графіки залежності значень складової P_v як функції подачі S_z при обробці Т-подібною фрезою $\varnothing 21$ сталеві заготовки (сталь 45):
1 – обробка «всуху» без видалення стружки;
2 – обробка з поливом без видалення стружки;
3 – обробка з видаленням стружки напірним струменем

Розроблені пристрої для примусового видалення стружки забезпечують підвищення продуктивності обробки профільних пазів на величину до 2-х разів (при збереженні точності і якості оброблюваних поверхонь у межах, що допускаються). Так, при фрезеруванні Т-подібних пазів 12 досягнуте збільшення хвилинної подачі S_M від 100 до 200 мм/хв.

Висновки

З використанням методології системного підходу розроблено серію (5) математичних моделей, що відображають різні етапи процесів накопичення та видалення стружки. Розроблено серію інженерних рішень (пристроїв видалення стружки), новизна та практична корисність яких підтверджена патентами України. На основі розробленої методики визначено раціональні параметри пристроїв для видалення стружки. В умовах спеціально побудованого стенду виконані експериментальні дослідження, які дозволили підтвердити адекватність розроблених математичних моделей та ефективність запропонованих інженерних рішень.

Література

1. Степанов, А. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве [Текст] / А. Сте-

панов // Информационно-аналитический PLM журнал «CAD/CAM/CAE Observer», Машиностроение и смежные области. – 2003. – № 4(13). – С. 1-8.

2. Пат. 68794 А України, 7 В 23 Q 11/02, В 23 Q 11/10. Різальний інструмент [Текст] / Нечепаяев В. Г., Івченко Т. Г., Гнисько О. М. (Україна). - № 2003109627 ; заявл. 27.10.2003 ; опубл. 16.08.2004, Бюл. №8. – 3 с.

3. Власов, А. Ф. Удаление пыли и стружки от режущих инструментов [Текст] / А. Ф. Власов. – М. : Машиностроение, 1982. – 240 с.

4. Куприн, А. И. Гидротранспорт стружки [Текст] / А. И. Куприн, А. М. Тихонцов. – М. : Машиностроение, 1978. – 80 с.

5. Нечепаяев, В. Г. Математична модель переміщення стружки різальним інструментом при фрезеруванні закритих профільних пазів [Текст] / В. Г. Нечепаяев, А. Н. Гнисько // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : Машинобудування і машинознавство. – Донецьк, 2005. – Вып. 92. – С. 72-82.

6. ГОСТ 7063-72 (СТ СЭВ 115-79, СТ СЭВ 4632-84). Фрезы для обработки Т-образных пазов. Технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 7063-63 ; введ. 01.01.1974. – М. : Изд. стандартов, 1985. – 13 с.

7. ГОСТ 10673-75. Фрезы с напаянными твердосплавными пластинами для обработки Т-образных пазов. Технические условия [Текст]. – Взамен ГОСТ 7063-63 ; введ. 01.01.1977. – М. : Изд. стандартов, 1993. – 11 с.

8. Нечепаяев, В. Математическая модель эвакуации стружки при фрезеровании закрытых профильных пазов [Текст] / В. Нечепаяев, А. Гнисько // Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare. Chisinau, Universitatea tehnica a Moldovei. – Chisinau, 2005. – Vol. 4. – P. 197-182.

9. Нечепаяев, В. Г. Исследование процесса заполнения закрытых профильных пазов стружкой при их фрезеровании [Текст] / В. Нечепаяев, А. Гнисько // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : Международный сб. научных трудов / Донецкий национальный технический университет. – Донецк, 2005. – Вып. 29. – С. 229-238.

10. Нечепаяев, В. Г. Разработка математической модели удаления стружки напорными струями СОТС при фрезеровании Т-образных пазов [Текст] / В. Нечепаяев, А. Гнисько // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов / Донецкий государственный технический университет. – Донецк, 2002. – Вып. 21. – С. 146-150.

References (BSI)

1. Stepanov, A. Vysokoskorostnoe frezerovanie v sovremennom proizvodstve [High speed milling in modern production]. *CAD/CAM/CAE Observer*, 2003, no. 4 (13), pp. 1-8.

2. Nechepayev, V. G., Ivchenko, T. G., Gnytko, O. M. *Rizal'nyy instrument* [Cutting tool]. Patent Ukraine, no. 2003109627, 2004.

3. Vlasov, A. F. *Udalenie pyli i struzhki ot rezhushchikh instrumentov* [Removing dust and chips from cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 240 p.

4. Kuprin, A. I., Tikhontsov, A. M. *Gidrotransport struzhki* [Hydraulic chip transport]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 80 p.

5. Nechepayev, V. G., Gnytko, O. M. Matematichna model' peremishchennya struzhky rizal'nym instrumentom pry frezeruvanni zakrytykh profil'nykh paziv [Mathematical model of chip movement by a cutting tool when milling closed profile slots]. *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Mashynobuduvannya i mashynoznavstvo*. Donetsk, 2005, vol. 92, pp. 72-82.

6. GOST 7063-72. *Frezy dlya obrabotki T-obraznykh pazov. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 7063-72. Cutters for processing T-shaped grooves. Specifications]. Moscow, Izd. standartov Publ., 1985. 13 p.

7. GOST 10673-75. *Frezy s napayannymi tverdospлавными пластинками для обработки Т-образных пазов. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 10673-75. Cutters with brazed carbide inserts for T-slots. Specifications]. Moscow, Izd. standartov Publ., 1993. 11 p.

8. Nechepayev, V., Gnit'ko, A. Matematicheskaya model' evakuatsii struzhki pri frezerovanii zakrytykh profil'nykh pazov [Mathematical model of chip evacuation when milling closed profile slots]. *Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare. Universitatea tehnica a Moldovei*, Chisinau, 2005, vol. 4, pp. 197-182.

9. Nechepayev, V. G., Gnit'ko, A. N. Issledovanie protsessy zapolneniya zakrytykh profil'nykh pazov struzhkoi pri ikh frezerovanii [Study of the process of filling closed profile grooves with chips during their milling]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya*, Donetsk, 2005, vol. 29, pp. 229-238.

10. Nechepayev, V. G., Gnit'ko, A. N. Razrabotka matematicheskoi modeli udaleniya struzhki napornymi struyami SOTS pri frezerovanii T-obraznykh pazov [Development of a mathematical model for chip removal by pressure jets of LC for milling T-slots]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya*, Donetsk, 2002, vol. 21, pp. 146-150.

Надійшла до редакції 14.01.2022, розглянута на редколегії 15.04.2022

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ПАЗОВ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ УДАЛЕНИЯ СТРУЖКИ

А. Н. Гнисько, А. В. Кузнецова

К числу эффективных, но недостаточно используемых в это время резервов совершенствования системы принудительного удаления стружки, относится значительный энергетический потенциал смазочно-охлаждающего технологического средства, которое подается в зону резания для смазывания и охлаждения режущего инструмента. Одной из причин такого положения является отсутствие цельной концепции совершенствования системы удаления стружки, а также практическая неизученность закономерностей их рабочих процессов при осуществлении принудительного воздействия на отделенную стружку именно при обработке профильных пазов. Приведенное свидетельствует об актуальности и важности для машиностроения Украины задачи создания высокопроизводительных систем принудительного удаления стружки для операций фрезерования профильных пазов на основе разработки теории их функционирования. В результате выполненных исследований решена важная задача, которая состоит в повышении производительности фрезерования профильных пазов за счет применения системы принудительного удаления стружки с рациональными параметрами. Разработанные технические решения для системы удаления стружки, которые обеспечивают повышение производительности фрезерования профильных пазов. Разработано системное представление процесса принудительного удаления стружки при фрезеровании профильных пазов, которое позволило выделить необходимое количество математических моделей. Разработаны частные и интегральная математические модели функционирования основных подсистем и модулей системы принудительного удаления стружки. Выполнено моделирование процесса принудительного удаления стружки. На основании моделирования разработана методика определения рациональных параметров системы принудительного удаления стружки при фрезеровании профильных пазов. Выполнены экспериментальные исследования, направленные на определение эффективности предложенных технических решений и подтверждение адекватности разработанных математических моделей. Созданная система удаления стружки обеспечивает повышение производительности фрезерования профильных пазов приблизительно в 2 раза при сохранении качества поверхностей и повышении стойкости режущего инструмента на величину не менее чем в 3 раза за счет применения системы принудительного удаления стружки с рациональными параметрами.

Ключевые слова: стружка; фрезерование профильных пазов; система принудительного удаления стружки; частные и интегральная математические модели; повышение производительности фрезерования; качество поверхностей; стойкость режущего инструмента; методика определения рациональных параметров.

INCREASING PROFILE SLOOT MILLING PERFORMANCE THROUGH IMPROVED CHIP REMOVAL SYSTEM

Oleksandr Gnytko, Anna Kuznetsova

Among the effective, but insufficiently used at this time, reserves for improving the system of forced chip removal include the significant energy potential of the lubricating and cooling technological agent, which is fed into the cutting zone to lubricate and cool the cutting tool. A reason for this situation is the lack of a coherent concept for improving the chip removal system, as well as the practical lack of knowledge of the laws of their working processes when exercising a forced effect on the separated chips precisely when processing profile grooves. The foregoing testifies to the relevance and importance for the mechanical engineering of Ukraine of the task of creating high-performance forced chip removal systems for profile slot milling operations based on the development of a theory of their functioning. Because of the research performed, an important task has been solved, which is to increase the productivity of milling profile slots by using a forced chip removal system with rational parameters. Developed technical solutions for the chip removal system, which provides an increase in the productivity of profile slot milling. A systematic representation of the process of forced chip removal during profile slot milling has been developed, which made it possible to identify the required number of mathematical models. Particular and integral mathematical models of the functioning of the main subsystems and modules of the forced chip removal system have been developed. A simulation of the process of forced removal of chips is carried out. Based on modeling, a technique has been developed for determining the rational parameters of the forced chip removal system when milling profile slots. Experimental studies have been conducted aimed at determining the effectiveness of the

proposed technical solutions and confirming the adequacy of the developed mathematical models. The created chip removal system provides an increase in the productivity of milling profile slots by approximately 2 times while maintaining the quality of surfaces and increasing the durability of the cutting tool by at least 3 times due to the use of a forced chip removal system with rational parameters.

Keywords: a chip; profile grooves milling; a chip compulsory removal system; private and integrated mathematical models; the increase in milling productivity; surface quality; the cutting tool firmness; a technique of rational parameters definition.

Гнисько Олександр Миколайович – канд. техн. наук, доц. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Кузнєцова Анна Вадимівна – канд. техн. наук, доц. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Oleksandr Gnytko – PhD, Associate Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.gnytko@khai.edu. ORCID: 0000-0002-6560-3262, Web of Science ResearcherID: AGN-1238-2022.

Anna Kuznetsova – PhD, Associate Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.kuznetsova@khai.edu.