

УДК 621.9

Середенко Б.М.; Заболотній О.А.; Оробченко А.П.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ТОРЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ

Seredenko B., Zabolotniy O., Orobchenko A.

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine (Bogdan_Seredenko@yahoo.com)

DETERMINATION OF CUTTING TEMPERATURE WHILE MILLING TITANIUM ALLOY BY FACE MILLS

В роботі наведений аналіз особливостей процесу високошвидкісного різання, яке головним чином пов'язує з температурою різання в залежності від швидкості обробки. Разом з тим, показано, що в залежності від конструкції та розмірів інструменту основний критерій зниження температури різання не завжди характеризує високошвидкісну обробку. Причиною цього є підвищення температури до значень, при яких можлива зміна властивостей поверхневого шару оброблюваного матеріалу. З метою визначення температури різання при обробці титанових сплавів, було проведено моделювання процесу торцевого фрезерування методом скінченних елементів дисковою фрезою Ø160. Визначені значення температури на контактних поверхнях при швидкостях різання від 80 до 250 м/хв. В даному діапазоні швидкостей обробки спостерігається зростання температури різання. Встановлено, що при швидкостях різання вище 80 м/хв на поверхні оброблюваної заготовки виникають температури, при яких утворюється крихкий шар. Результати моделювання були перевірені експериментально при фрезеруванні титанового сплаву ВТ6.

Ключові слова: торцева фреза; титановий сплав; температура; моделювання; швидкість різання.

Вступ. Одним з перспективних методів обробки матеріалів різанням є високошвидкісна обробка (ВШО), яка застосовується в різних галузях промисловості. Головним чином даний вид обробки реалізується при високошвидкісному фрезеруванні деталей фасонного профілю на верстатах з ЧПК.

Високошвидкісне фрезерування знайшло застосування в авіабудуванні, при обробці сплавів на основі алюмінію для виготовлення моторних блоків, цільних тонкостінних деталей та інших [1]. Крім того, високошвидкісне фрезерування використовують для важкооброблюваних матеріалів, до яких відносять загартовані сталі твердістю до 70 HRC для виготовлення штампів, прес форм [2], а також для обробки титанових сплавів при виготовленні моноколіс ГТД, довгомірних деталей зварних конструкцій, корпусів двигунів [3, 4].

В теперішній час не існує єдиної класифікації, яка визначає високошвидкісну обробку. В роботах [5, 6] запропонована класифікація високошвидкісної обробки в залежності від оброблюваного матеріалу. Згідно до неї за швидкістю різання, розрізняють зону традиційної обробки, перехідну зону та високошвидкісну. Однак дана класифікація є неповною, так як під терміном ВШО розуміють поєднання всіх технічних засобів здатних підняти швидкість обробки вище прийнятого рівня (традиційного різання) [7, 8, 9].

Серед технічних засобів, що забезпечують здійснення процесу ВШО поряд з верстатом, оснащенням, системами ЧПК та програмування, важливе місце займає різальний інструмент.

Разом з тим, ефективність використання ВШО пов'язана з тепловими явищами, які виникають в зоні різання. В найбільшій мірі дослідження температури процесу високошвидкісного різання титанових сплавів виконувалось при токарній обробці [10] та фрезеруванні кінцевими фрезами [11, 12], в той же час, як процес ВШФ торцевими фрезами є малодослідженим.

В діапазоні швидкостей характерних для традиційної обробки при фрезеруванні титанових сплавів спостерігається значне підвищення температури різання [13], зокрема на різальній кромці, що негативно впливає на різальні властивості інструменту. До того ж, через високу хімічну активність титану, підвищення температури оброблюваної поверхні вище 600°C може призвести до утворення крихкого окисовмісного шару, що знижує експлуатаційні властивості виробу [14].

Тому виникає задача з однієї сторони у визначенні швидкості різання при якій підвищення температури не призводить до утворення окисовмісного шару, а з другого - визначення температури різання на швидкостях вищих прийнятого рівня при фрезеруванні торцевими фрезами титанових сплавів.

Мета роботи. Визначення температури різання при торцевому фрезеруванні на основі моделювання методом скінченних елементів.

Аналіз попередніх досліджень. Дослідженню температури різання при високошвидкісному фрезеруванні титанових сплавів присвячені роботи [11, 12, 15, 16], в яких визначення температури виконувалось на основі експериментальних досліджень, математичного або чисельного моделювання.

Головним чином, дослідження температури високошвидкісного фрезерування титанових сплавів проводилися при різанні кінцевими фрезами. В роботі [11] при моделюванні процесу фрезерування пазу довжиною 48 мм кінцевою фрезою $\varnothing 9,5$ мм з $z=4$ було визначено температуру в зоні різання та виконано її експериментальну перевірку. Температура визначена при моделюванні перевищувала експериментальну на 100°C , що пояснювалося використанням абсолютно жорсткого інструменту. Крім того, в роботі не представлені умови експериментального визначення температури різання.

В роботі [12] при фрезеруванні титанового сплаву кінцевою фрезою $\varnothing 22,5$ мм при швидкостях різання 157 м/хв та 235,5 м/хв було виконано прогнозування сил різання та температури різального інструменту. Результати моделювання показують, що максимальна температура на твердосплавному лезі досягає 550°C при швидкості 235,5 м/хв, однак температура поверхневого шару заготовки в даній роботі не досліджувалась.

Також проводилися дослідження високошвидкісного фрезерування дисковими фрезами [15]. На основі 2D моделі процесу фрезерування титанового сплаву дисковою тристоронньою фрезою з $z=10$ та $\varnothing 300$ мм в широкому діапазоні швидкостей, від 50 до 500 м/хв були визначені значення максимальних температур різання та встановлено, що зі збільшенням швидкості різання, температура різання зростає. Проте, згідно досліджень [17, 18], при високошвидкісній обробці матеріалів спостерігається діапазон швидкостей, при яких температура різання знижується.

В той же час, проблема визначення температури при високошвидкісному фрезеруванні торцевими фрезами є малодослідженою. В роботах [3, 16] було розроблено теплофізичну модель високошвидкісного торцевого фрезерування, що базувалася на методі джерел теплоти. В результаті, автором було розраховано значення температури різання в залежності від швидкості різання. За результатами дослідження, значення оптимальної швидкості торцевого фрезерування складає 73 м/хв, при якій температура різання не перевищує 557°C . Однак, запропоновану величину швидкості різання згідно класифікації в роботі [19] не можна однозначно віднести до високошвидкісної обробки.

Аналіз попередніх досліджень показує, що при високошвидкісній обробці титанових сплавів вплив конструкції різального інструменту не досліджувався, а також не встановлено, в яких діапазонах швидкості різання для заданого інструменту спостерігається зниження температури. З розвитком чисельних методів моделювання процесів механічної обробки найбільш ефективним є застосування методу скінченних елементів (МСЕ) для визначення температури в зоні різання, зокрема на різальному лезі, заготовці та стружці.

Тому виникає задача моделювання процесу різання титанового сплаву в програмному середовищі, що реалізує МСЕ.

Моделювання процесу фрезерування МСЕ. Моделювання МСЕ проводилося в програмному середовищі AdvantEdge. AdvantEdge є спеціалізованим програмним продуктом моделювання процесів механічної обробки для визначення напружено-деформованого стану, сил та температури різання, на основі яких можливе вдосконалення різального інструменту та оптимізація процесу різання.

Скінченно-елементна модель процесу фрезерування була створена в діалоговому режимі, згідно до алгоритму програмного середовища.

В якості оброблюваного матеріалу було використано заготовку з титанового сплаву ВТ6 (властивості

аналогічні сплаву Ti6Al4V з бібліотеки програмного продукту), а інструментальний матеріал - твердий сплав ВК8. При 3D моделюванні процесу різання, основними параметрами, що характеризували різальний інструмент були геометричні параметри: $\alpha=6^{\circ}$, $\gamma=3^{\circ}$, $R=0,8\text{мм}$, $\rho=0,04\text{мм}$.

Поділ на елементну сітку був виконаний в програмному середовищі, задаючи мінімальний розмір елемента: для заготовки ця величина становить 0,05 мм, для інструменту - 0,03 мм. Форма скінченних елементів (СЕ) для інструменту та заготовки у вигляді тетраєдрів (рис. 1).

Початкова температура різання відповідала нормальній температурі навколишнього середовища 20°C .

Режими різання, що використовувалися для моделювання процесу різання (табл. 1) були вибрані згідно рекомендацій [20] щодо обробки титанових

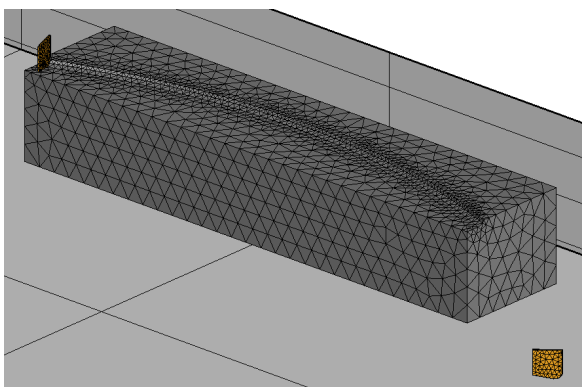


Рис. 1. СЕ сітка для моделювання

сплавів кінцевими фрезами при високошвидкісній обробці:

Таблиця 1

Режими різання для моделювання

V, м/хв	80	125	158	200	250
Sz, мм/зуб	0,05				
t, мм	0,5				

В результаті моделювання було виконане визначення розподілу температури в зоні різання при різних швидкостях різання (рис. 2).

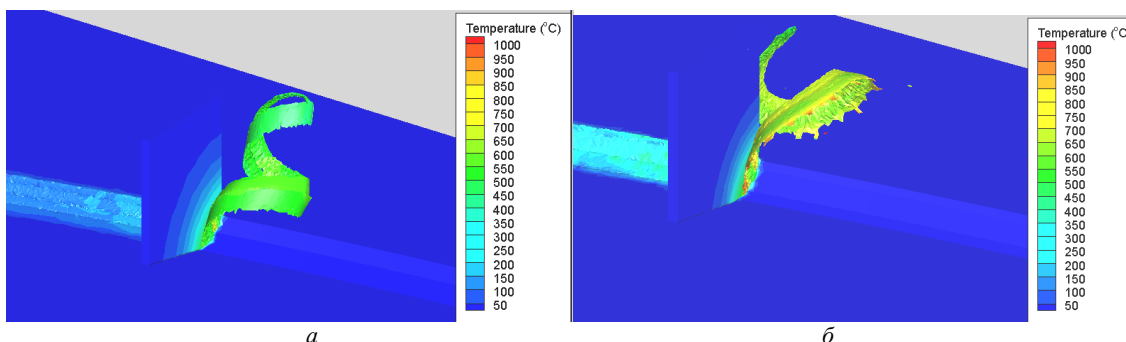


Рис. 2. Розподіл температури при різних значеннях швидкості
a - рис 2.а V=80 м/хв; *б* - рис. б V=250 м/хв

Як видно з рис. 2 при швидкості різання $V=80$ м/хв максимальна температура спостерігається на поверхні утвореної стружки і досягає 620°C . В той же час, на поверхні інструменту температура становить 560°C , а на заготовці - 470°C .

З підвищенням швидкості різання до 250 м/хв спостерігається зростання величини температури. Так, на поверхні стружки максимальна температура досягає 985°C , на різальному лезі - 870°C , а на поверхні заготовки 740°C , що може призвести до появи структурних перетворень у поверхневому шарі титанового сплаву.

Таким чином, для запобігання утворення окисновмісного шару в титановому сплаві, фрезерування торцевими фрезами слід проводити при швидкості, яка не перевищує 80 м/хв, що в свою чергу перевищує рекомендований рівень (50...60 м/хв).

Згідно [21] за температуру різання приймають усереднені значення температури на передній та задній поверхнях різального інструменту в зоні контакту зі стружкою та оброблюваною поверхнею. Як показує моделювання, в діапазон швидкостей вищих прийнятого рівня зі збільшенням швидкості різання температура зростає.

На рис.3 представлені значення температури при кожному із значень швидкостей різання:

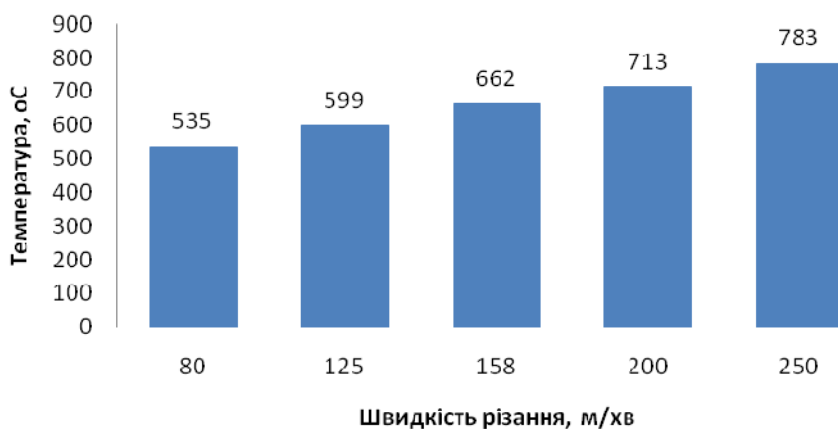


Рис. 3. Температура різання при різних значеннях швидкості

Проте результати моделювання потребують експериментальної перевірки.

Експериментальна перевірка результатів моделювання. Експериментальна перевірка результатів моделювання здійснювалася на основі використання штучної термопари. Термопара була закріплена на заготовці, на 0,2 мм нижче рівня зрізаного шару та на відстані 100 мм з початку різання.

Вимірювання проводилися на вертикально-консольного фрезерного верстату моделі 6M12П, який відповідав нормам точності та жорсткості згідно ГОСТ 17734-88. В якості оброблюваного матеріалу використовувалася заготовка розмірів 120x60x100 мм з титанового сплаву ВТ6 по ГОСТ 19807-91.

Для проведення експерименту були вибрані торцеві фрези Ø160 мм з механічним кріпленням $z=5$ багатограних (п'ятигранних) пластин з твердого сплаву ВК8. Після кожного досліду відбувався поворот багатограних пластинок.

В дослідженні передбачалося проведення 5-ти дослідів, кожен з яких повторювався 3 рази новою вершиною п'ятигранної пластини. Досліди проводилися з постійною глибиною різання $t=0,5$ мм, подачею на зуб $S_z=0,05$ мм/зуб та змінними швидкостями різання 80, 125, 158, 200 і 250 м/хв. Після обробки результатів, були визначені температури заготовки для кожного експерименту та занесені до таблиці 2.

Таблиця 2

Температура при різних режимах обробки

V, м/хв.	80	125	158	200	250
T _{екс.} , °C	32,4	43,9	49,3	55,8	60,3
T _{мод.} , °C	28,7	39,8	41,3	47,9	52,8
Δ, %	11,4	9,2	16,2	14,1	12,3

Порівнюючи результати моделювання та експериментального дослідження, спостерігається кореляція отриманих результатів, а їх відхилення не перевищує 17%, що є прийнятним результатом.

Висновки:

1. Моделюванням та експериментальною перевіркою встановлено, що для запобігання утворення крихкого шару на поверхні титанового сплаву при фрезеруванні торцевими фрезами Ø160 мм та $z=5$ рекомендованою є швидкість різання не більше 80 м/хв.

2. Показано, що термін високошвидкісна обробка не може трактуватися залежністю швидкості і температури для певного матеріалу без врахування особливостей всієї технологічної системи.

3. При торцевому фрезеруванні титанових сплавів в діапазоні швидкостей від 80 до 250 м/хв, при збільшенні швидкості різання температура різання зростає.

Аннотація. В роботі приведен анализ особенностей процесса высокоскоростного резания, которое главным образом связывают с температурой резания в зависимости от скорости резания. Вместе с тем, показано, что в зависимости от конструкции и размеров инструмента основной критерий снижения температуры резания не всегда характеризует высокоскоростную обработку. Причиной этого есть повышение температуры до значений, при которых возможны изменения свойств поверхностного слоя обрабатываемого материала. С целью определения температуры резания при обработке титанового сплава, было проведено моделирование процесса торцевого фрезерования методом конечных элементов дисковой фрезой Ø160. Определены значения температуры на контактных поверхностях при скоростях резания от 80 до 250 м/мин. В этом диапазоне скоростей обработки наблюдается повышение температуры резания. Установлено, что при скоростях резания выше 80 м/мин на поверхности обрабатываемой заготовки возникают температуры, при которых образуется хрупкий шар. Результаты моделирования были проверены экспериментально при фрезеровании титанового сплава ВТ6.

Ключевые слова: торцевая фреза; титановый сплав; температура; моделирование; скорость резания.

Abstract. In this article, the analysis process features high-speed cutting, which mainly attributed to the cutting temperatures depending on the speed of processing. Shows that depending on the design and tool size main criterion decrease temperature cutting not always characterized by high-speed processing. The reason for this is the rise temperature to values at which to change properties of the materials surface layer. To determine the cutting temperature of titanium alloys processing, we carried mechanical milling process simulation with mill Ø160 by finite element method. Defined temperature on contact surfaces at cutting speeds between 80 and 250 m/min. In this range of speed observed temperature cutting increase. Established, with cutting speeds higher 80 m/min workpiece surface have temperature at which the fragile layer formed. The simulation results verified experimentally in the milling of titanium alloy VT6.

Keywords: face mill; titanium alloy; temperature; modeling; cutting speed.

References

1. "High-speed processing: key to increase in productivity and quality" [Vysokoskorostnaja obrabotka: ključ k povyšheniju proizvoditel'nosti i kachestva], available at: <http://engine.aviaport.ru/issues/67/page33.html>.
2. Kostjuk, G.I., Postel'nik, T.A. and Voropaj, R.V. (2012), "Research of influence of speed of cutting and giving on efficiency of processing of the tempered steel shkh15", *Vestnik NTU "KPI". Series: Technology in Engineering*, no 53, pp. 127-135.
3. Kirjushin, D.E. and Nasad, T.G. (2005), "Processing by cutting of titanic alloys", *SHTU*, pp. 105-108.
4. Kachan, A.Ja., Petrov, S.A., Panasenko, V.A., Mozgovoj, S.V. and Karas', G.V. (2006), "Technology of processing of axial monowheels high-speed milling", *Production technology of aircraft*, no 1, pp. 12-18.
5. Jashhericyn, P.I., Fel'dshtejn, E.Je. and Kornievich, M.A. (2006), *Teorija rezanija: ucheb* [Theory of cutting: textbook], New knowledge, Minsk, Belorussia.
6. Kishurov, V.M., Krioni, N.K., Postnov, V.V. and Chernikov, P.P. (2009), *Rezanie materialov. Rezhushhij instrument: ucheb. posobie* [Cutting of materials. The cutting tool: manual], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
7. Solovov, A. "High-speed processing" [Vysokoskorostnaja obrabotka], available at: <http://www.obo-rt.ru/arhiv>.
8. "High-speed processing" [Vysokoskorostnaja obrabotka], available at: <http://www.delcam-ural.ru/cam/tehpodderjka>.
9. "High-speed processing" [Vysokoskorostnaja obrabotka], available at: <http://www.mirprom.ru>.
10. Basharov, R.R., Kudojarov, R.G., Utkina, E.A., Grachev, M.S. (2015), "Research of high-speed turning of details from titanic alloy", *Space equipment, high technologies and innovations*, no 1, pp. 126-129.
11. Escamilla, I., Zapata, O., Gonzalez, B. and Gámez, N. (2010), "Finite Element Simulation Of The Milling Process Of A Ti6AL4V Alloy", *SIMULIA Customer Conference*, Providence, USA.
12. Monno, M., Pittalà, G. and Linares, F. (2007), 3D Finite Element Modeling of Milling of Titanium, *Proceeding of 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*.
13. Korjagin, S.I., Pimenov, I.V. and Hudjakov, V.K. (2000), *Sposoby obrabotki materialov: Uchebnoe posobie* [Ways of processing of materials: Manual], Kaliningrad, Russia.
14. Kudrjavcev, I.V. (1967), *Materialy v mashinostroenii. Vybór i primenenie* [Materials in mechanical engineering. Choice and application], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
15. Trusov, V.N., Skuratov, D.L., Zakonov, O.I. and Shikin, V.V. (2011), "Influence of the modes of cutting on temperature when milling preparations from the hardly processed materials", *Aviation and missile and space equipment*, no 1, pp. 57-62.
16. Kirjushin, D.E. and Nasad, T.G. (2005), "Heatphysical features of use of the tools equipped with a wearproof covering for high-speed processing" [Teplofizicheskie osobennosti primenenija instrumentov, osnashhjonnyh iznosostojkim pokrytiem, dlja vysokoskorostnoj obrabotki], *Heatphysical and technological aspects of quality management in mechanical engineering*, Tolyatti.
17. Mazur, N.P., Vnukov, Ju.N. and Grabchenko, A.I. (2013), *Osnovy teorii rezanija materialov: uchebnyk* [Bases of the theory of cutting of materials: textbook], in Mazur, N., Grabchenko, A. (ed.), Kharkiv, Ukraine.
18. Soltus, N. (2015), *High-speed processing: current state of a question*, in Tugolukova, A.V. (ed.), pp.105-112.
19. Schulz, H. and Moriwaki, T. (1992), "High Speed Cutting", *Annals of CIRP*, Vol. 41, no 2, pp. 637-643.
20. "Identification of peak productivity at high-speed processing" [Vyjavlenie pikovoj proizvoditel'nosti pri vysokoskorostnoj obrabotke] available at https://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/Images/17610_tcm802-83550.
21. Jakimov, A.V., Slobodjanik, P.T. and Usov, A.V. (1991), *Teplofizika mehanicheskoj obrabotki: Ucheb. posobie* [Machining thermophysics: Manual], Lybid', Kiev, Odessa, 240 p.

Подана до редакції 30.10.2016