

РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ ТЕОРІЇ РІЗАННЯ МЕТОДАМИ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Б.Д. Сторож, Я.Б. Сторож, Я.М. Кулик

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422)40137,
e-mail: public@nimg.edu.ua

Подано огляд і узагальнення використання сучасних методик і засобів для розв'язання задач теорії різання методом скінченно-елементного аналізу, а також наведені результати експериментального і скінченно-елементного дослідження процесу стружкоутворення при прямокутному різанні гартованої сталі 45.

Ключові слова: стружкоутворення, скінченно-елементний аналіз, режими різання, сила різання, напруження.

Дан обзор и обобщение использования современных методик и средств для решения задач теории резания методом конечно-элементного анализа, а также приведены результаты экспериментального и конечно-элементного исследования процесса стружкообразования при прямоугольном резании закаленной стали 45.

Ключевые слова: стружкообразование, конечно-элементный анализ, режимы резания, сила резания, напряжение.

There are presented survey and generalization of up-to-date techniques used for the theory of material cutting problem solution by using of finite element analysis as well as results of experimental and finite element studying of hardened steel 45 chip formation during orthogonal cutting

Keywords: chip formation, finite element analysis, cutting parameters, cutting force, stresses.

Вступ

Обробка матеріалів різанням широко використовується з початку промислової революції, тобто з середини 18 століття, а її наукові дослідження мають більше ніж столітню історію [1, 2]. Однак вивчена вона далеко недостатньо. Такий стан зумовлений як складністю явищ, що супроводжують різання, так і можливостями їх експериментального дослідження. Так, різання матеріалів характеризується поєднанням взаємовпливів механічних, теплофізичних, хімічних і трибологічних явищ і процесів, що локалізовані в порівняно малих об'ємах і чутливі до властивостей оброблюваного матеріалу, що змінюються під впливом режимів і умов обробки, високошвидкісної деформації і значних градієнтів температури. З огляду на широкомасштабне використання цього методу обробки та споживання ним значних суспільних ресурсів, його удосконалення є важливим і актуальним. Отже, метод скінченно-елементного аналізу (СЕА) відкриває широкі можливості для повнішого вивчення процесів механічної обробки металів, насамперед важкообробних матеріалів, кращого розуміння механізмів формування стружки, трибологічних явищ у контактах заготовки з інструментом і формування властивостей оброблених поверхонь [1, 3, 4]. Водночас публікації із застосування методу СЕА у цій царині свідчать, що його методичні підходи залежать від завдань дослідження, можливостей обладнання, програмного, інформаційного і математичного забезпечення. Тому подальший реальний внесок зазначеного методу в поглиблене розуміння процесів різання, потребує значного розширення обсягу таких досліджень і

систематизації досвіду як щодо методики побудови скінченно-елементних моделей, так і результатів їх реалізації.

Мета роботи – огляд та узагальнення відомих результатів досліджень, присвячених використанню методу СЕА для розв'язку задач теорії різання і дослідження цим методом процесу стружкоутворення при прямокутному різанні гартованої сталі 45.

Методика дослідження

Способи формулювання задачі деформування матеріалу. Аналіз літературних джерел свідчить, що в моделюванні засобами СЕА суцільне середовище може описуватися двома формулюваннями – Ейлера і Лагранжа. В аналізі Лагранжа розрахункова ґратка моделі деформується разом з матеріалом, тоді як у постановці Ейлера вона фіксується в просторі. Обчислення за Лагранжем зводиться до визначення розміщення ґратки в дискретні моменти часу і реалізується явним або неявним часовим інтегруванням. Неявне придатніше для розв'язування лінійних статичних задач, тоді як явне – для нелінійних динамічних, якими є задачі різання металів. Тому більшість досліджень опирається на формулювання Лагранжа, яке дає змогу моделювати процес формування стружки від зародження до усталеного процесу. Проте формулювання Лагранжа потребує критерію для відділення стружки від заготовки, наприклад, щільність енергії деформації, ефективний деформаційний критерій [5]. Хоча неявне формулювання Лагранжа пов'язано зі значно більшими часовими затратами у зв'язку з багаторазовим мешуванням твердотільної моделі, його

іноді використовують для моделювання утворення зливної і сегментної стружки [3, 6, 7].

Модель стану матеріалу. Точні і надійні моделі напружень плинності матеріалу є вкрай необхідними для опису поведінки матеріалу в умовах високошвидкісного різання. В ході тривалої еволюції розвитку математичних моделей стану оброблюваного матеріалу остаточно сформована її базова модель, запропонована Джонсоном і Куком [7]. Вона описує зміну еквівалентних напружень плинності матеріалу під впливом деформації, швидкості деформації і температури за рівнянням

$$\bar{\sigma}_T = \left(A + B(\bar{\epsilon})^n \right) \times \left(1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{nl} - T_0} \right)^m \right], \quad (1)$$

де: $\bar{\epsilon}$ – пластична еквівалентна деформація; $\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}$ – швидкість пластичної деформації, нормованої щодо $\dot{\bar{\epsilon}}_0$; T , T_0 і T_{nl} – поточна і кімнатна температура, а також температура плавлення оброблюваного матеріалу відповідно; A – межа плинності матеріалу за кімнатної температури і швидкості деформації $1/c$; B , C , n і m – параметри моделі, що характеризують вплив деформації і швидкості деформації на зміцнення матеріалу, а також температури на його зменшення.

Модель (1) достатньо проста і добре узгоджується з експериментальними даними, отриманими випробуваннями як з малими деформаціями і швидкостями деформацій за кімнатної температури, так і випробуваннями руйнування зі швидкістю деформації до 1000/c і за температури до 600°C [3-6, 8]. Завдяки цьому рівняння Джонсона-Кука використовується найчастіше. Зауважимо, що в університеті штату Огайо (США) робочою групою під керівництвом доктора Т. Алана створена перша в світі база даних рівнянь стану матеріалів. У середині 2005 року вона охоплювала дані для 108 матеріалів [8].

Моделювання відриву стружки. Руйнування матеріалу є невід’ємною частиною процесу різання. Для будь-якого типу руйнування (в’язкий чи крихкий) критерій руйнування може бути сформульований як у термінах пластичної деформації, так і в термінах напружень [9]. Через неможливість із достатньою точністю експериментально визначити граничну величину критерію одночасно в обох термінах [9, 10] і наблизений характер методу СЕА як щодо розрахунку напружень, так і моменту руйнування [11] на практиці в кожному конкретному випадку слід обирати тип критерію. Наприклад, якщо відбувається крихке руйнування, то величина пластичної деформації до руйнування хоча і більша за нуль, але близька до нього, тоді як величина напружень значна. Тому при оцінці моменту початку руйнування крихкого мате-

ріалу за критерієм у термінах пластичної деформації виникає значна похибка, а застосування критерію в напруженнях забезпечить точний і стійкий розв’язок задачі.

Отже, для матеріалів, що руйнуються крихко, критерієм руйнування може бути умова $\sigma_1 > \sigma_{роз}$. Досвід свідчить, що для матеріалів, які деформуються в’язко, узагальненим є критерій накопичених пластичних деформацій у формі В.Л. Колмогорова [12] та Джонсона-Кука [13]

$$D = \sum \Delta \bar{\epsilon}^{nl} / \bar{\epsilon}_p^{nl} \geq 1, \quad (2)$$

де: $\Delta \bar{\epsilon}^{nl}$ – приріст еквівалентної пластичної деформації; $\bar{\epsilon}_p^{nl}$ – еквівалентна деформація під час руйнування. Сума виконується за всіма приростами аналізу. При цьому еквівалентну деформацію розраховують за формулою

$$\bar{\epsilon}_p^{nl} = \left[d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q}) \right] \times \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\bar{\epsilon}^{nl}}{\epsilon_0} \right) \right] \cdot \left(1 + d_5 \frac{T - T_0}{T_{nl} - T_0} \right), \quad (3)$$

де: d_1 - d_5 – параметри руйнування, визначені нижче перехідної температури; p і q – гідростатичний тиск і напруження Мізеса відповідно.

В алгоритмах методу СЕА формування стружки реалізують, переважно, одним із двох способів: новим адаптивним мешуванням навколо вершини тріщини на кожному кроці переміщення різального леза або з видаленням елементів, у яких в ході обчислення досягнуто стан критерію руйнування. Перший спосіб істотно збільшує тривалість обчислень. Другий – ефективніший, тому застосовується найчастіше. Проте він пов’язаний із втратою матеріалу – в разі виконання умови (2) тензор напружень Коші встановлюється рівним нулю, і елементи видаляються з моделі.

Моделювання тертя. Численні дослідження свідчать, що успішне СЕА напружень плинності металів у процесі різання потребує також вирішення проблеми моделювання тертя між заготовкою й поверхнями інструменту.

Згідно з сучасними уявленнями контакт стружки з передньою поверхнею різального леза поділяють на пластичну (розміщена біля різальної кромки) і пружну ділянки. На першій ділянці спостерігається схоплювання стружки з інструментом і рух стружки визначається опором зсуву матеріалу стружки (інакше його внутрішнім тертям). При цьому контактні напруження зсуву s сягають межі плинності матеріалу τ_{max} [5]

$$s = \tau_{max}, \quad \mu p \geq \tau_{max}, \quad (4)$$

де: p – нормальні напруження в контакт; μ – коефіцієнт тертя.

На пружній ділянці контакту переміщення стружки залежить від її зовнішнього тертя з передньою поверхнею інструменту, а напру-

ження s залежать від нормальних напружень в контактні і можуть бути описані в форматі закону Кулона [5]

$$s = \mu p, \quad \mu p < \tau_{\max}, \quad (5)$$

Моделі (4) і (5) зручні для інтегрування з моделями (1) і (3).

Вибір програмного забезпечення. Аналіз сучасних публікацій свідчить, що для СЕА процесів різання використовується, в основному, комерційне програмне забезпечення, насамперед продукти DEFORM, TWA, LS-DYNA і ABAQUS [3, 5, 6, 9, 14]. Ці програмні продукти мають відкриту архітектуру, дають змогу користувачам додавати власні процедури й істотно інтенсифікувати дослідження. Хоча програмний пакет TWA орієнтований винятково на моделювання процесу різання, але на відміну від решти пакетів він не має опцій для модифікації моделей матеріалу, тертя і руйнування. Цей пакет, а також DEFORM орієнтовані більше на виробничі потреби, а не на дослідження. LS-DYNA забезпечує підвищену продуктивність моделювання багатокомпонентних систем, але має обмежений інтерфейс користувача. ABAQUS займає лідируючі позиції за частотою використання для моделювання процесів різання завдяки своїм розширеним можливостям і зручному інтерфейсу користувача. Тому в даній роботі нами віддана перевага саме цьому програмному продукту.

Побудова скінченно-елементної моделі.

В середовищі ABAQUS/Explicit параметричну модель заготовки з гартованої сталі 45 у вигляді прямокутного паралелепіпеда з розмірами (в мм) $8 \times 1 \times 2$ формували зі структурованих 8-вузлових лінійних кубічних елементів C3D8R, а різального клина з твердого сплаву тієї ж ширини – з вільних елементів C3D8R (рис. 1). З метою скорочення машинного часу мешування моделі в місцях очікуваного контакту стружки і клину, виконано значно дрібнішим: розмір елементів ділянки утворення стружки складає 15 мкм, елементів на вершині клину – 5 мкм, а в площині очікуваного відділення стружки від заготовки – 1×5 мкм. Змінними параметрами моделі вибрано: для заготовки – товщина зрізуваного шару (a) 0,1 і 0,2 мм, а для різального клина – передній кут (γ) 0° , 5° і 10° . Моделювання контактної взаємодії між стружкою і різальним клином здійснено двобічним типом контакту з головною поверхнею, сформованою елементами передньої поверхні клина, і підлеглою, яка визначається вузлами заготовки в ділянці утворення стружки.

Параметри моделі Джонсона-Кука руйнування матеріалу за рівнянням (3) прийнято такими ж, як і для гартованої сталі-аналога AISI 1045 [15]: $d_1=0,06$; $d_2=3,31$; $d_3=-1,96$; $d_4=0,0018$; $d_5=0,58$. Інші параметри сталі: модуль пружності – 200 ГПа; коефіцієнт Пуассона – 0,3; густина – $7,8 \text{ г/см}^3$; межа міцності на розтяг – 1312,6 МПа; межа плинності – 202,9 МПа; коефіцієнт тертя з твердим сплавом – 0,25; тепло-

ємність – 432,6 Дж/кг/К. Швидкість різання прийнято 70 м/хв.

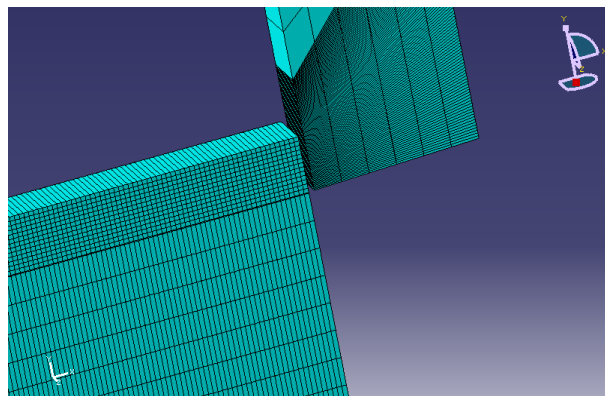


Рисунок 1 – Частина тривимірної моделі для дослідження процесу стружкоутворення при прямокутному різанні

В ході СЕА різання гартованої сталі 45 фіксували розподіл еквівалентних напружень у заготовці, довжину ділянок заготовки (L) і відповідних їм довжин стружки (L_C) по поверхні її контакту з різальним лезом, сили (нормальну N і тертя F) у контакт "стружка-інструмент" і кут зсуву (ϕ). Розраховували:

коефіцієнт вкорочення стружки (K_L) двома методами за формулами [1]:

$$K_L = \frac{L}{L_C} \quad (6)$$

та

$$K_L = \frac{\cos(\phi - \gamma)}{\sin \gamma}; \quad (7)$$

питому силу різання (Н/мм^2) – за допомогою формули

$$P_{z0} = \frac{P_z}{a \cdot b} = \frac{N \cdot \cos \gamma + F \cdot \sin \gamma}{a \cdot b}, \quad (8)$$

де: P_z – головна складова сили різання в Н; a і b – товщина і ширина зрізуваного шару в мм.

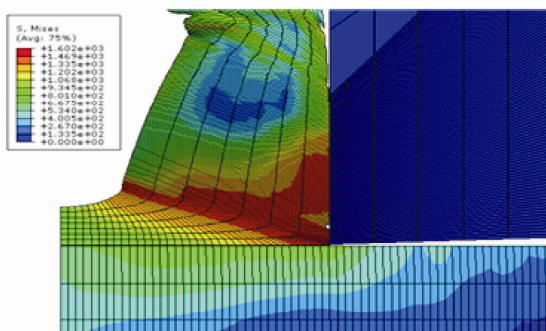
Методика експериментального дослідження. Експериментальне дослідження процесу різання здійснювали на заготовці трубчастій форми з гартованої сталі 45 (HRCe=41) із зовнішнім діаметром 50 мм і товщиною 3 мм. Заготовку обробляли на токарному верстаті моделі 1A616 гострозаточеним різцем з твердого сплаву T15K6 із геометричними параметрами: головний кут в плані 90° , задній кут 8° , головний передній кут 0° , 5° і 10° на режимах різання, що відповідають параметрам СЕА (рис. 2). В ході експерименту вимірювали: за допомогою механічного динамометра головну складову сили різання (P_z), лінійною довжиною стружки (L_C) по поверхні її контакту з інструментом (відповідна довжина заготовки (L) по її середньому діаметру складала 70,8 мм); розраховували коефіцієнт вкорочення стружки за рівнянням (6), питому силу різання P_{z0} , коефіцієнт тертя і кут зсуву з використанням залежності (7).



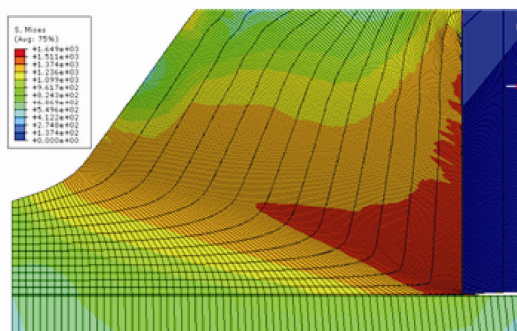
Рисунок 2 – Загальний вигляд апаратурного налагодження для експериментального дослідження процесу різання

Результати дослідження та їх аналіз

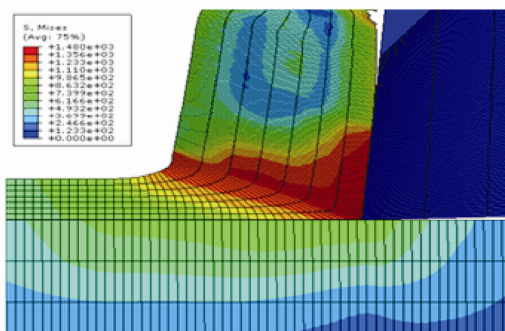
Результати моделювання свідчать, що після 1,5-1,8 мс від моменту втискання різального клина в заготовку (рис. 3) процес різання набуває усталеного характеру – стабілізуються товщина стружки, сили і розподіл напружень у зоні різання. Аналіз розподілу еквівалентних напружень у заготовці для всіх розглянутих моделей (рис. 3) свідчить, що найбільші їхні значення спостерігаються у двох її ділянках перед передньою поверхнею різального клина: відносно вузькій майже прямокутної форми, нахилений під кутом φ до напрямку його переміщення, і вздовж передньої поверхні клина, де їх розподіл набуває трикутної форми. Деяке розширення першої ділянки у напрямку до передньої поверхні клина є проявом деформаційного зміцнення матеріалу. Наявність другої ділянки з високим рівнем напружень (найвищим у контакті з клином) свідчить про протікання



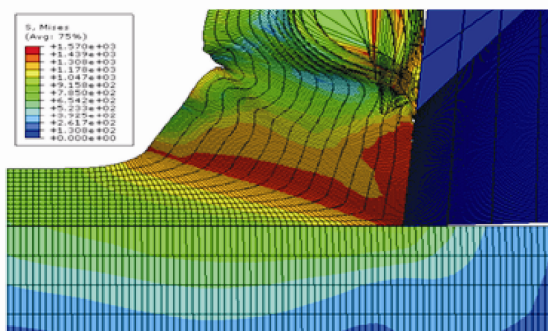
1-a)



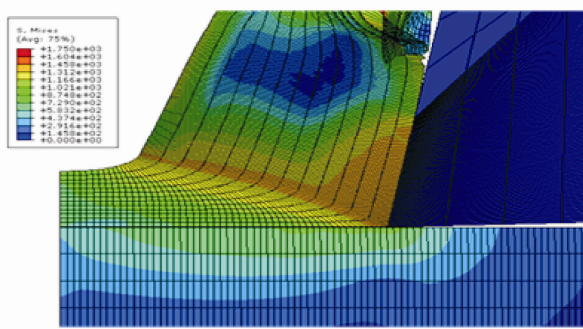
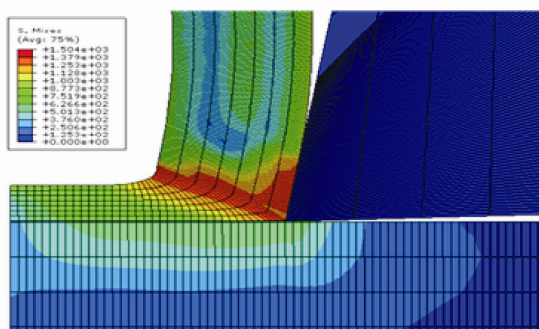
2-a)



1-б)



2-б)



1) $a=0,1$ мм; 2) $a=0,2$ мм; а) $\gamma=0^\circ$; б) $\gamma=5^\circ$; в) $\gamma=10^\circ$

Рисунок 3 – Розподіл еквівалентних напружень у заготовці в момент 2,5 мс від початку різання

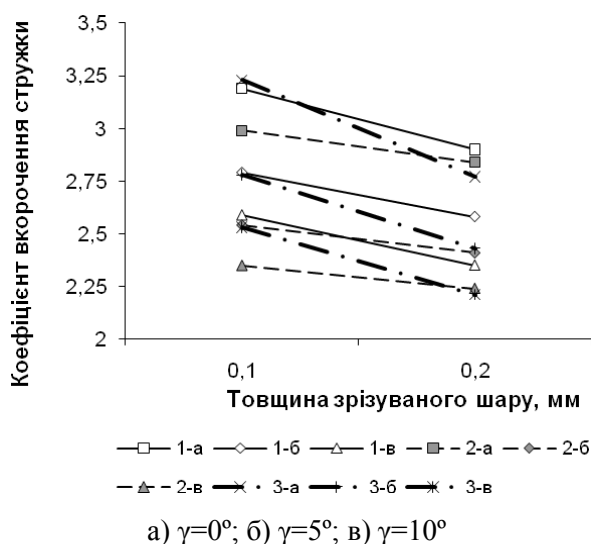


Рисунок 4 – Вплив товщини зрізаного шару (а) і переднього кута (γ) на коефіцієнт вкорочення стружки за результатами СЕА (1 і 3) і експерименту (2) з розрахунком за формулою 6 (1 і 2), за формулою 7 (3)

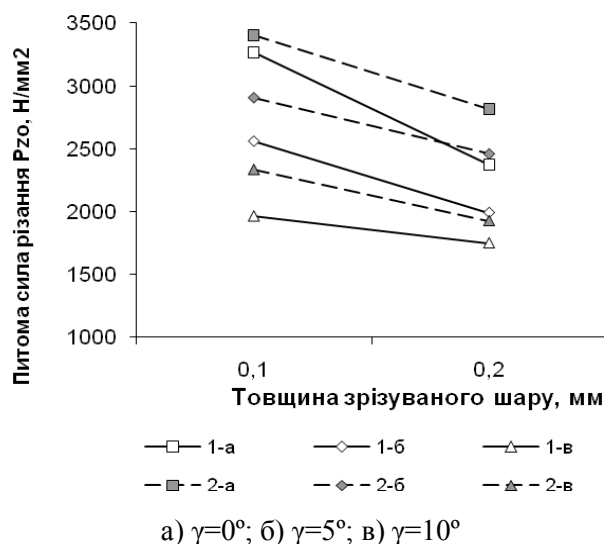


Рисунок 5 – Вплив товщини зрізаного шару (а) і переднього кута (γ) на питому силу різання за результатами СЕА (1 і 3) і експерименту (2) з розрахунком за формулою 6 (1 і 2), за формулою 7 (3)

додаткової пластичної деформації матеріалу стружки біля передньої поверхні різального клина. Наведені результати добре узгоджуються з даними численних експериментальних досліджень (методами ділильних сіток, мікротвердості) [1]. Вони підтверджують також загальноприйняте положення, що основна пластична деформація при утворенні зливної стружки відбувається на так званій ділянці первинної деформації, товщина якої є достатньо малою. Вплив деформації стружки на ділянці вторинної деформації (біля передньої поверхні клина) на напружений стан у стружці та зміцнення матеріалу порівняно невеликий.

Результати розрахунку коефіцієнта вкорочення стружки і питомої сили різання теж підтверджуються експериментом (рис. 4 і 5) – ці параметри зменшуються зі збільшенням товщини зрізаного шару і переднього кута. Отримані залежності пояснюються зменшенням ступеня деформації внаслідок зменшення кута різання і зменшення тертя стружки по передній поверхні. Так, збільшення переднього кута від 0° до 10° супроводжується збільшенням кута зсуву з 20,2° до 23,7° і з 17,2° до 21,1° при а 0,2 і 0,1 мм відповідно. За цих же умов ступінь деформації стружки зменшується з 3,086 до 2,522 і з 3,540 до 2,788, а коефіцієнт тертя – від 0,278 до 0,231 і від 0,238 до 0,224.

Зауважимо, що за даними СЕА спостерігається менша питома сила різання порівняно з результатами експерименту (в межах 6-18%). Така невідповідність пояснюється тим, що в комп'ютерному аналізі тертя по задній поверхні інструменту не моделювалось.

Отже, наведені дані вказують на задовільні як якісну, так і кількісну відповідність результатів СЕА і експерименту щодо формування стружки в процесі різання гартованої сталі. В подальшому планується дослідити розподіл

нормальних і тангенційних сил у контакті "заготовка-інструмент" і вплив радіуса заокруглення різального леза на напружено-деформований стан у заготовці.

Висновок

На підставі аналізу й узагальнення літературних джерел, присвячених використанню МСА для моделювання процесів різання, вибрані методика СЕ-моделювання і вивчено стружкоутворення при прямокутному різанні гартованої сталі 45 твердосплавним інструментом засобами СЕА та натурального експерименту. Підтверджено можливість використання МСЕ для розв'язку задач теорії різання в процесі оброблення гартованих матеріалів.

Література

- 1 Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів: підручник / [М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок та ін.]; під заг. ред. М.П. Мазура. – Львів : Новий Світ-2000, 2010. – 422 с.
- 2 Сторож Б.Д. Технологічні основи машинобудування : навч. посібник / Б.Д. Сторож, М.П. Мазур, Р.Т. Карпик, В.Д. Каразей. – Івано-Франківськ – Хмельницький: ТУП, 2003. – 153 с.
- 3 Kalhori V. Modeling and simulation of mechanical cutting: Doctoral thesis / V. Kalhori. – Lulea: Lulea university of technology, 2001. – 103 p.
- 4 Heisel, U. Cause Analysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances / U. Heisel, D. V. Krivoruchko, V. A. Zaloha, M. Storchak // Proc. of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. – Calabria, 2007. – P. 141-148.

5 Ng E. Modeling of hard part machining / Eu-Gen Ng, David K. Aspinwall // J. Mat. Proc. Technology, v.127, 2002. – P. 222-229.

6 Ozel T. Influence of friction models on finite element simulations of machining // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 2004. – P. 345-353.

7 Johnson G.R. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures / G.R. Johnson, W.H. Cook // Proceedings of the 7th Int. Symp. on Ballistics. – 1983. – P. 541-547.

8 Altan T. Material database for machining simulation / T. Altan – Ohio: Ohio state university, 2000. – 20 p. Електронний ресурс: [Http://nsm.eng.ohio-state.edu/madams](http://nsm.eng.ohio-state.edu/madams).

9 Strenkowski J.S. A finite element model of orthogonal metal cutting / J. S. Strenkowski., J. T. Carroll // Journal of Engineering for Industry: Trans. of ASME. – 1985. – V. 107. – P. 349-354.

10 Золоторевский В.С. Механические свойства металлов : учебн. для вузов / В.С. Золоторевский. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

11 Stein E. Encyclopedia of Computational Mechanics / E. Stein, B.R. De, T.J. Hughes. 2 v. – Chichester: John Wiley & Sons Inc, 2004. – V.2: Solids and Structures. – 798 p.

12 Колмогоров В.Л. Напряжение, деформация, разрушение / В.Л. Колмогоров. – Л.: Металлургия, 1970. – 229 с.

13 Johnson G.R. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures / G.R. Johnson, W.H. Cook // Int. J. Eng. Fract. Mech. – 1985. – P. 31-48.

14 Masillamani D.P., Chessa J. Determination of optimal cutting conditions in orthogonal metal cutting using LS-DYNA // Proc. of the 8th international LS-DYNA users conference. - 2004. - V9. – P. 27-36.

15 Duan C.Z. Finite element simulation and experiment of chip formation process during high speed machining of AISI 1045 / C.Z. Duan, T. Dou, Y.J. Cai, Y.Y. Li. // Int. j. of recent trends in engineering 2009, - v.1, (5), - P. 134-143.

Стаття надійшла до редакційної колегії

12.07.10

*Рекомендована до друку професором
Петриною Ю.Д.*