

Моделювання сил різання при розточуванні крупногабаритних отворів у жароміцному сплаві Inconel 718

М.М. Шихалєєв¹ • В.В. Медведєв¹

Received: 28 December 2020 / Accepted: 24 May 2021

Анотація. Розроблено комп'ютерну математичну модель розточування отвору в деталі, що виготовлена з жароміцного сплаву на основі нікелю та хрому Inconel 718. Використано метод скінчених елементів (МСЕ) для вирішення чисельної задачі розточування. Для опису фізичних властивостей матеріалу розточуваної деталі з Inconel 718 у вирішувачі було обрано модель матеріалу за Джонсоном-Куком. У якості матеріалу інструмента було обрано модель абсолютного твердого недеформованого тіла та надано динамічної жорсткості по трьом осям. Отримано графіки сил і моментів різання для змінної глибини різання. На початку різання, крім плавного збільшення сил різання, беруть участь також високочастотні коливання з амплітудами 1–3 Н. Отримана сила різання має виражені гармонічні коливання на низьких частотах. Максимальний сплеск амплітуди відбувається в період від 0,9 до 1,3 секунди від початку різання. В цей час рекомендується здійснювати плавне збільшення сил різання за допомогою зміни режимів різання. Високочастотні коливання, які були незначними у розрізі кожної складової сил різання, за рахунок підсумовування та коливань державки відіграють вирішальну роль у коливаннях розточувального моменту.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, розточування, самовиникаючі коливання, сили різання, Inconel 718.

Вступ

Розточування отворів у корпусних деталях супроводжується механічними самовиникаючими вібраціями (автоколиваннями) [1]. Такі вібрації знижують якість і продуктивність розточувальних операцій на верстатах з ЧПУ, знижують ресурс роботи інструменту. Визначити такі вібрації у процесі оброблення можна багатьма способами, наприклад, акустичними. Для визначення вібраційних процесів, що відбуваються в технічній оброблюючій системі, також можна використати комп'ютерне моделювання. Один з найпоширеніших методів – метод скінчених елементів, що дозволяє досить точно моделювати задачу визначення коливання сил в оброблюючій системі та інших параметрів (наприклад, звукові явища при обробленні, температурний розподіл і зони різання тощо [2]).

При механічному обробленні різанням деталей з жароміцних сплавів нікелю Inconel 718 самовиникаючі автоколивання залишають сліди на поверхні готової деталі [1], що впливає на її експлуатаційні характеристики. Деталі з жароміцних матеріалів широко застосовують в атомній енергетиці, авіації, ракетно-космічній техніці. Головна перевага жароміцних сплавів у порівнянні з конструкційними сталями – здатність чинити опір пластичним деформаціям при значних температурах [3].

Сили різання при взаємодії інструмента і заготовки у процесі розточування активно впливають на генерацію самовиникаючих коливань, що, в свою чергу, залишають небажані сліди на поверхні обробленої деталі – впливають на якість поверхонь [1]. Найбільший вплив на генерацію регенеративних коливань при розточуванні має радіальна складова сили різання [4].

Мета роботи

Метою роботи є комп'ютерне моделювання процесу розточування глибокого отвору в корпусній деталі зі значним діаметром і співвідношенням діаметра D заготовки до довжини заготовки $1 D / l = 2 \dots 5$ для

✉ М.М. Шихалєєв
2texter18@i.ua

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

дослідження сил різання з урахуванням температурних ефектів процесу взаємодії заготовки та інструмента при обробленні жароміцного конструкційного матеріалу Inconel 718 та аналіз графіків коливань сил різання.

Методика. Чисельні розрахунки, результати та їх обговорення

Самовиникаючі регенеративні вібрації при обробленні виникають через взаємодію інструмента і заготовки. Фазовий зсув між поточним і попереднім прорізом різальної пластини спричинює вібрації інструмента з частотою самовиникаючих коливань ω_s , що є близькими до переважаючих природних структурних коливань системи [1]. Динамічна модель розточування з трьома ступенями та одним ступенем вільності представлена на рис.1. Де m_i – маса інструмента (кг), m_s – маса заготовки, (кг), k_{ni} – жорсткість системи по відповідним осям (кг/с²), C_{ni} – демпфер по відповідним осям (кг/с). Матеріал інструмента – інструментальна сталь. Механічні характеристики матеріалів [5, 6], що застосовуються при моделюванні, представлено в таблиці 1, графік залежності густини і модуля Юнга від температури матеріалу Inconel 718 представлено на рис. 2.

Заготовку можна вважати жорстко закріпленою в затиску пристрої, а вібрації інструменту є визначальними для генерації похибок на обробленій поверхні [7]. Зі збільшенням глибини різання частота самовиникаючих коливань збільшується [8], а обмежуюча глибина різання обернено залежить від коефіцієнту різання у напрямку подачі та дійсної частини передатної функції каналу радіальної сили різання [4], за умов сталості всіх інших параметрів оброблення (обертання заготовки).

Таблиця 1. Механічні характеристики матеріалів, що використані при моделюванні

Матеріал	Механічні характеристики			
	Густина, г/см ³	Модуль Юнга, Гпа	Коефіцієнт Пуассона	Модуль пружності, кН/мм ²
Inconel718	8,22	165	0,3	205
Сталь	7,85	200	0,3	180

Приклад поверхні, що утворена при обробленні з автоколиваннями і без автоколивань представлено на рис.3. Як видно з рисунка, автоколивання характеризуються періодичністю.

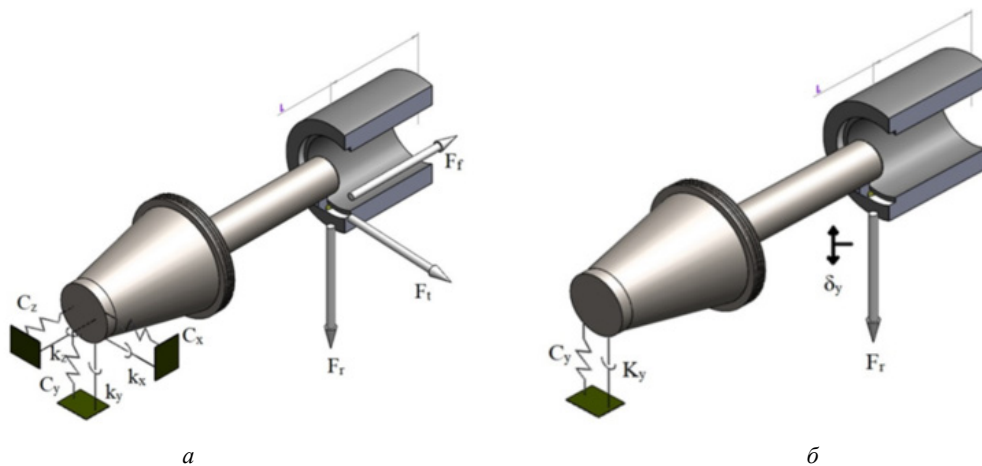


Рис. 1. Динамічна модель різання для системи з трьома ступенями вільності (а), з однією ступеню вільності (б)

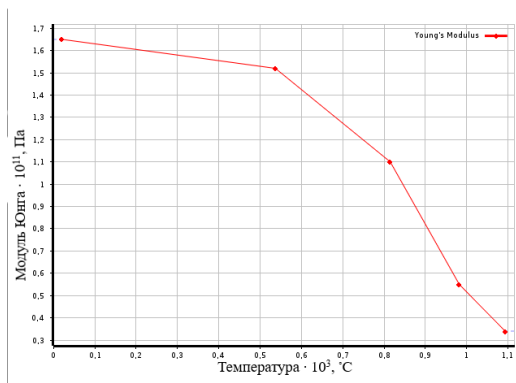
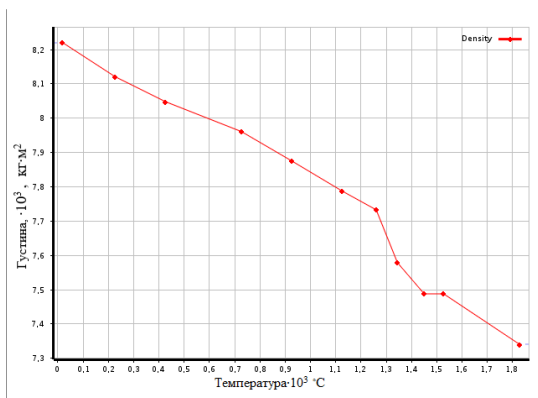


Рис.2. Графік залежності густини а) та модуля Юнга б) сплаву Inconel 718 від температури

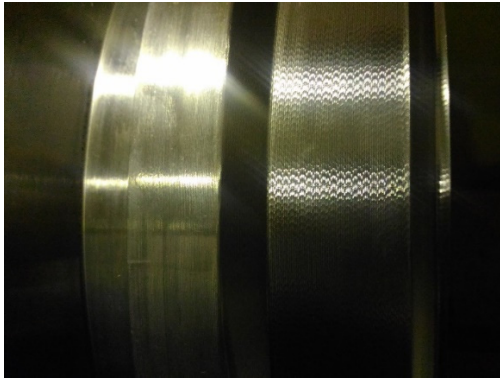


Рис. 3. Поверхня, що утворена при обробленні корпусної деталі в системі з ефектом автокочування (приклад)

Опис комп'ютерної моделі

Для моделювання сил різання при розточуванні використано високонелінійний вирішувач LS – Дуна [9]. Використано явне формулювання задачі вирішувача (explicit) з розрахунком термомеханічної складової (coupled thermal – structural) з розрахунком адиабатної температури [10] для врахування теплових ефектів. Кінематична схема оброблення – однолезове оброблення з обертанням заготовки і рухом подачі інструменту. Обертання заготовки реалізовано через ключове слово INITIAL_VELOCITY_GENERATION вирішувача LS – Дуна [9]. Модель матеріалу [10] у вирішувачі задано через модель 015 – Johnson_Cook [11], з фізичним критерієм руйнування [10] $\epsilon f = \max(D1, EFMIN)$, при чому значення параметра ϵ , що відповідає коефіцієнту формули матеріалу D1 в ключових словах вирішувача, прийнято рівним 2,5 [2]. Всі інші коефіцієнти у формулі для фізичної моделі руйнування не враховуються.

Внаслідок фрикційних процесів в моделі різання “заготовка–інструмент”, тепло, що утворюється в зоні різання, йде в стружку, а інструмент і заготовка нагріваються несуттєво [12]. На рис. 4 наведено конфігурацію комп'ютерної моделі [13–15].

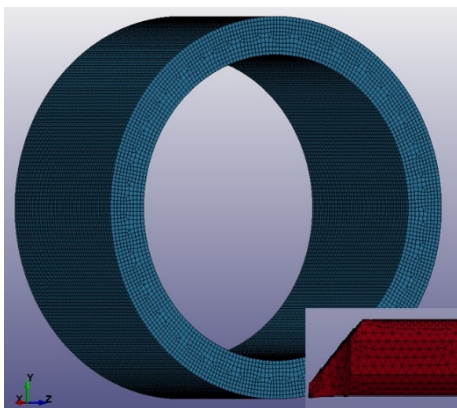
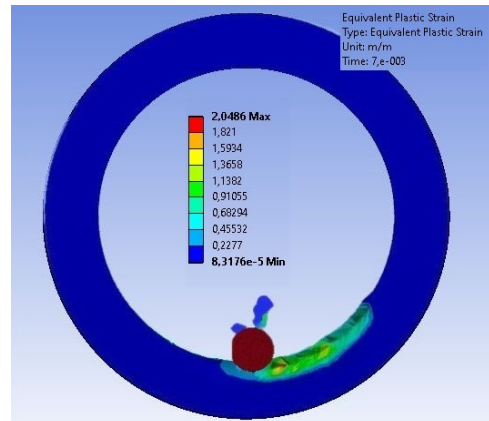
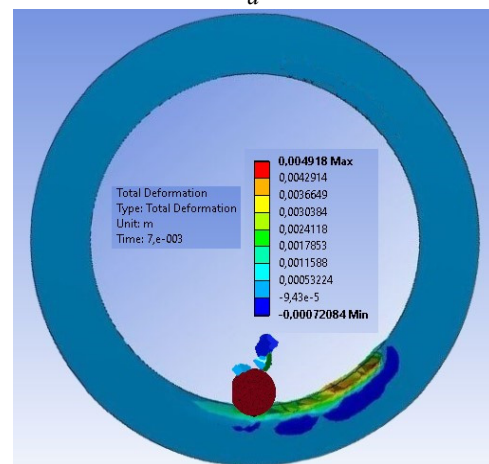


Рис. 4. Геометрія комп'ютерної моделі

На рис. 5–6 показано поля показників 3 – D моделювання, пластична деформація (рис. 5 а), повна деформація (рис. 5 б), а також розподілення еквівалентних напружень за фон Мізесом (рис. 6).



а



б

Рис. 5. Показники процесу розточування, визначені в результаті моделювання: а) пластична деформація, б) повна деформація

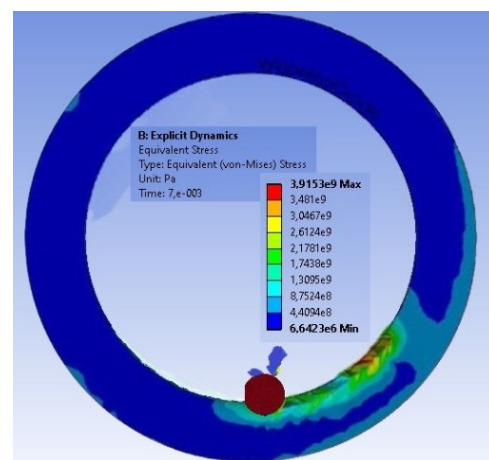


Рис. 6. Показник процесу розточування еквівалентне напруження по фон Мізесу

Результати чисельних експериментів

Графіки сил різання при розточуванні наведені на рис. 7–8. Так, сила різання має виражені гармонічні коливання на низьких частотах. Так, найвище значення сили різання при глибині різання 1 мм складає приблизно 12 кН, і досягається на початку різання, при врзанні. Далі, при стабілізації різання, сила різання плавно спадає, і набуває сталі значення. А для більших глибин різання пік коливань досягається при врзанні інструменту, а далі відбуваються зменшені гармонічні коливання сил різання. Високочастотні коливання, які були незначними у розрізі кожної складової сил різання, за рахунок підсумовування та коливань державки відіграють вирішальну роль у коливаннях моменту.

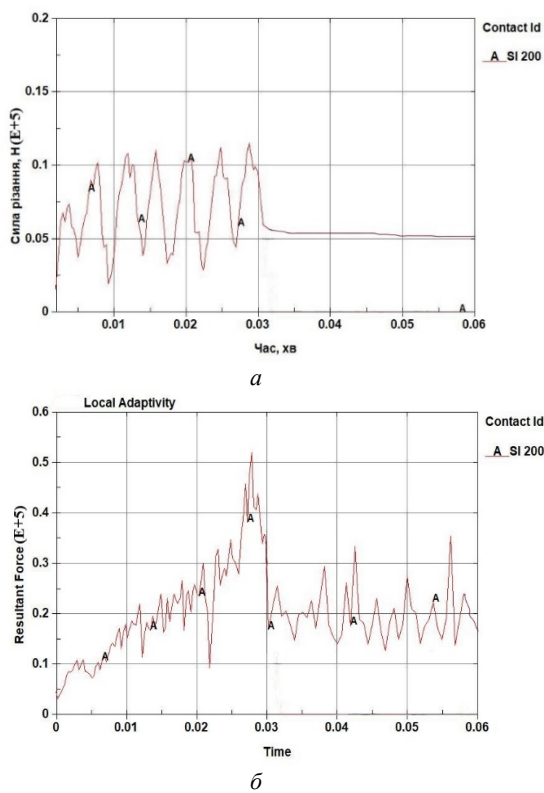


Рис. 7. Сили різання при розточуванні (а) для глибини різання 1 мм, (б) для глибини різання 3 мм

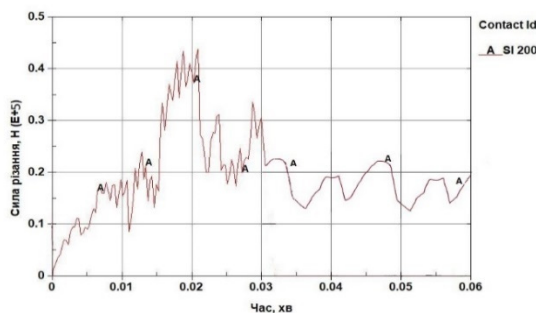


Рис. 8. Сили різання при розточуванні для глибини різання 5 мм на сторону

Моменти сили різання представлено на рис.9–10. Відбувається стабілізація моментів сил різання при досягненні пікових значень коливань.

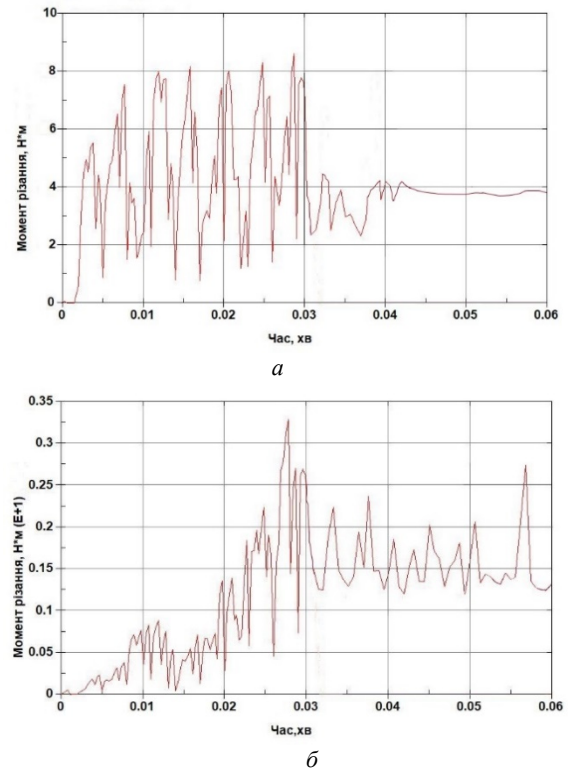


Рис. 9. Момент різання а) для глибини різання 1 мм на сторону, б) для глибини різання 3 мм на сторону.

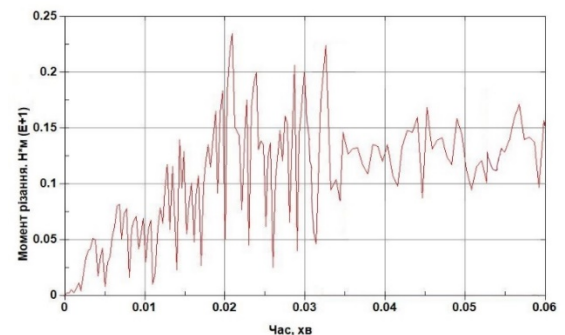


Рис. 10. Момент різання для глибини різання 5 мм на сторону

Амплітуда коливань сил різання та моменту різання при моделюванні залежить від глибини різання. А амплітуди коливань та їх форма значно різняться [16–18].

Енергію тертя в контактні заготовка – інструмент при різанні наведено на рис.11. Для глибини різання 1 мм графік позначено зеленим кольором, для 3 мм відповідно червоним, для 5 мм – синім. При досягненні певного рівня після початку різання, енергія тертя змінюється несуттєво [19–21].

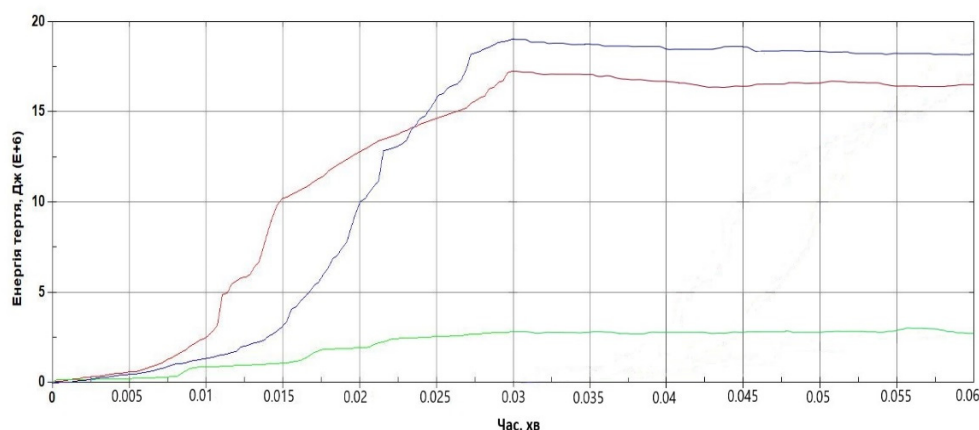


Рис. 11. Енергія тертя при моделюванні

Висновки

Комп'ютерне моделювання дає можливість оцінки сил різання при механічному обробленні. В результаті математичного моделювання було отримано графіки сил різання при розточуванні заготовки, виготовленої з жароміцного сплаву Inconel 718. Як видно з графіка, при недостатній динамічній жорсткості технічної обробляючої системи по трьом осям, при збільшенні глибини різання можуть виникати самовиникаючі вібрації, що є небажаними для оброблення.

Рекомендується через режими різання проводити плавне наростання сил різання. Амплітуда коливань сил різання залежить від глибини різання. Також, на величину сил різання, а отже і генерацію регенеративних коливань при розточуванні не жорсткими борштангами мають вплив такі параметри режиму різання, як оберти шпинделя, довжина виставу борштанги, матеріал заготовки тощо. Також рекомендується збільшувати жорсткість обробляючої системи та підбирати режими різання (подачу, оберти заготовки) для усунення регенеративних коливань.

References

1. F. Atabey, I. Lazoglu and Y. Altintas, "Mechanics of boring processes – Part I", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, No. 43, pp. 463–476, 2003. doi: 10.1016/S0890-6955(02)00276-6
2. D.V. Krivoruchko, V.A. Zaloga, "Modelirovanie protsessov rezaniya metodom konechnykh elementov", in *Metodologicheskie osnovy: monografiya*; Sumy: Universitetskaya kniga, 2012.
3. J.P. Davim, *Machining of hard materials*, London: Springer, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-450-0>
4. B. Moetakef-Imani, N.Z. Yussefian, *Dynamic simulation of boring process*, No. 49, pp. 1096–1103, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.07.008>
5. Yu.P. Solntsev, E.I. Pryakhin, *Materialovedenie*, Moscow: Khimizdat, 2007.
6. Yu.Yu. Zhiguts, *Splavi, sintezovani metalotermicyu i SVS-protsesemi*, Uzhgorod: Grazhda, 2008.
7. H. Li, E. Du., "Simulation of rock fragmentation induced by a tunnel boring machine disk cutter", *Advances in Mechanical Engineering*, No 8, pp. 1–11, 2016. <https://doi.org/10.1177/1687814016651557>
8. C.T. Tyler, J.R. Troutman, T.L. Schmitz, "A coupled dynamics, multiple degree of freedom process damping model, Part 1: Turning", *Precision Engineering*, No. 46, pp. 65–72, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.03.017>
9. LS-DYNA® Keyword User's Manual Volume I, Ftp.lstc.com, [Online]. Available: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Vol_I.pdf
10. LS-DYNA® Keyword User's Manual Volume II Material Models Ftp.lstc.com, [Online]. Available: https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna_manual_volume_ii_r12.pdf
11. Y. Zhang, J.C. Outeiro, T. Mabrouki, "On the Selection of Johnson-cook Constitutive Model Parameters for Ti-6Al-4 V Using Three Types of Numerical Models of Orthogonal Cutting", *Procedia CIRP*, No. 31, pp. 112–117, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.052>
12. D. Parle, R.K. Singh, S.S. Joshi, "Modeling of Specific Cutting Energy in Micro-Cutting using SPH Simulation", *IWWMF2014, 9th INTERNATIONAL WORKSHOP ON MICROFACTORIES*. 2014, No. 9, pp. 121–126.
13. S. Shlyk, V. Khorolskiy and M. Naumova, "Simulation of the chamfering process in dies", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, No. 774, p. 42, 2015. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39999>
14. M. Madaj and M. Piška, "On the SPH Orthogonal Cutting Simulation of A2024-T351 Alloy", *Procedia CIRP*, Vol. 8, pp. 152–157, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.081>
15. Z. Wang, Q. Zeng, Z. Lu, "Numerical Simulation of Rock Cutting with a Diamond Sawblade Based on LS-DYNA", *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1–15, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6462909>

16. G.M. Vigovskii, "Tekhnologichne zabezpechennya visokoshvidkисnoї obrobki detalei", *Visnik*, No. 4 (75), 2015.
17. V. Korenjkov, I. Chornyj and M. Sikajlo, "Determination of dynamic characteristics of technological processing system", in *XVI Mezhduнародna nauchna praktychna konferencyja nastojashhy yzsledvannya y razvytye*, Sofia, 2020, pp. 19–22.
18. N.K. Chandiramani, and T. Pothala, "Dynamics of 2-dof regenerative chatter during turning", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 290, No. 1–2, pp. 448–464, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.04.012>
19. E. Budak, L.T. Tunc, "Identification and modeling of process damping in turning and milling using a new approach", *CIRP Annals*, No. 59, pp. 403–408, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.078>
20. M.H. Miguelez, L. Rubio, J.A. Loya, J. Fernandez-Sáez, "Improvement of chatter stability in boring operations with passive vibration absorbers", *International Journal of Mechanical Sciences*, No. 52, pp.1376–1384, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2010.07.003>
21. G.Zhang, C. Guo, "Modeling of Cutting Force Distribution on Tool Edge in Turning Process", *Procedia Manufacturing*, No. 1, pp. 454–465, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.001>

Modeling of cutting forces while boring heat – resistant alloy Inconel 718

Maksym Shykhaliiev, Vadim Medvedev

Abstract. In this work, authors had made computer FEM (finite element method) simulation of machining holes in part made of heat-resistant alloy Inconel 718. For this simulation nonlinear solver LS – Dyna had been used. Material type for physical modeling of workpiece have been selected to Johnson-Cook formulation. Tool configuration is rigid and have dynamic stiffness in three dimensions in the fastening points. Graphs of cutting forces and moments of cutting for three different depths of cut had been obtained. In the beginning of the cutting, in addition to the smooth increase of cutting forces, high – frequency oscillations with amplitudes of 1–3 N also take parts. The resulting cutting force has pronounced harmonic oscillations at low frequencies. The maximum burst of amplitude occurs in the period from 0.9 to 1.3 seconds from the start of cutting. It is recommended to carry out a smooth increase of cutting forces at this time through cutting modes. High – frequency oscillations, which were insignificant in the context of each component of the cutting forces, due to the summation and oscillations of the holder play a crucial role in the oscillations of the boring moment.

Keywords: Machining simulation, boring, FEM, frequencies, cutting forces.

Моделирование сил резания при расточке крупногабаритных отверстий в жаропрочной сплаве Inconel 718

М. М. Шихалеев, В. В. Медведев

Аннотация. Разработана компьютерная математическая модель расточки отверстия в детали, изготовленной из жаропрочного сплава на основе никеля и хрома Inconel 718. Использован метод конечных элементов (МКЭ) для решения численной задачи расточки. Для описания физических свойств материала растачиваемой детали из Inconel 718 в решателе была использована модель материала по формулировке Джонсон-Кук. В качестве материала инструмента была выбрана модель абсолютного твердого недеформированного тела с динамической жесткостью по трем осям. Получены графики сил и моментов резания для переменной глубины резания. В начале резания, кроме плавного увеличения сил резания, участвуют также высокочастотные колебания с амплитудами 1–3 Н. Полученная сила резания имеет выраженные гармонические колебания на низких частотах. Максимальный всплеск амплитуды происходит в период от 0,9 до 1,3 секунды от начала резания. В это время рекомендуется осуществлять плавное увеличение сил резания с помощью режимов резания. Высокочастотные колебания, которые были незначительными в разрезе каждой составляющей сил резания, за счет суммирования и колебаний державки играют решающую роль в колебаниях момента растачивания.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, расточка, самовозникающие колебания, силы резания, Inconel 718.