

© С.Т. Пацера¹, В.А. Дербаба¹, В.М. Рубан¹, С.С. Дубровський²

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² Дніпровський технологічний університет «ШАГ», Дніпро, Україна

ВІРТУАЛЬНИЙ ПРИЛАД ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНЬ В ЗОНІ КОНТАКТУ ЛЕЗА ЗІ СТРУЖКОЮ

© S. Patsera¹, V. Derbaba¹, V. Ruban¹, S. Dubrovskiy²

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² «Dnipro Technological University «STEP»», Dnipro, Ukraine

A VIRTUAL DEVICE FOR COMPUTER SIMULATION OF STRESSES IN THE AREA OF BLADE-CHIP CONTACT

Мета. В сучасних умовах підготовки кваліфікованих фахівців для роботи в машинобудівній галузі існує потреба у дистанційному інструментарії дослідження напружень, що виникають під час механічного оброблення виробів машинобудування. Тому метою даної роботи є створення відповідного віртуального пристрою.

Методика. Метод дослідження включає аналіз відомих аналітичних залежностей, класифікацію параметрів процесу на адекватні вихідні дані та функціональні аргументи і, нарешті, побудову оцифрованого обчислювального алгоритму. Програмну реалізацію створеного віртуального інструменту здійснено в середовищі NI LabVIEW 7.1. Вибір вказаного програмного продукту ґрунтується на наступних позитивних методологічних особливостях, таких як: потужний інструментальний засіб для створення графічних програм, що являють собою віртуальні прилади, зручні засоби для розробки складних експериментальних стендів, систем автоматизації та управління, моделювання процесів та інших завдань, що стоять перед сучасною наукою, зручність використання завдяки графічному інтерфейсу, можливість створення модульних програм, підтримку безлічі апаратних засобів і платформ, а також широкий спектр інтегрованих інструментів для аналізу даних та візуалізації результатів, можливість проведення наукових досліджень на основі отримання та використання моделей досліджуваних об'єктів, явищ та процесів.

Результати. Розраховані за допомогою віртуального приладу величини нормальних та тангенціальних напружень в зоні контакту стружки з лезом добре співпадають з опублікованими раніше даними.

Наукова новизна. З урахуванням прийнятих обмежень щодо інтервалів значень параметрів процесів механічного оброблення сталі 45 та сталі X18H10T встановлено графіки залежностей нормальних і тангенціальних напружень від довжини контакту стружки з лезом.

Практична значимість. Створений віртуальний пристрій для проведення комп'ютерного моделювання напружень у зоні контакту леза зі стружкою впроваджено в навчальний процес при підготовці магістрів та аспірантів за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Ключові слова: *різання металів, комп'ютерний експеримент, LabVIEW.*

Вступ. Мається суттєва кількість наукових публікацій, які стосуються термомеханічного моделювання явищ у різанні матеріалів. Так, наприклад, в роботах [1–9] значна увага приділяється комп'ютерному моделюванню напружено-деформованого стану матеріалів безпосередньо в зоні різання. У праці [1] була запропонована нова феноменологічна модель для опису напружень потоку

аустенітної нержавіючої сталі. У статті [2] з метою вивчення динамічної поведінки сталі 45 матеріал досліджувався за допомогою експериментів і симуляцій. Робота [3] присвячена чисельному моделюванню фрезерування алюмінієвих сплавів. У статті [4] представлено заснований на моделюванні підхід до оцінки технологічних зусиль складних багатоосьових токарних процесів. У роботі зусилля моделюються як функція товщини та ширини недеформованої стружки. Відзначається [5], що моделювання процесу різання методом скінчених елементів дає кращі знання процесів утворення стружки, виділення тепла в зоні оброблення, рівні напружень. У статті [6] розглянуто зону різання та стиснення стружки із сталі С45 та інструментальна сталь 62SiMnCr4. Огляд [7] об'єднує множини відповідних аспектів у розробці моделювання методом скінчених елементів. Підкреслюється [8], що термомеханічна взаємодія інструменту зі стружкою залежить від довжини контакту леза інструменту зі стружкою. Чисельне моделювання різання металу [9] з ретельною експериментальною перевіркою є вигідним підходом, який сприяє оптимізації процесу та підвищенню продуктивності.

Мета роботи і постановка задачі. Як показує аналіз джерел інформації, для проведення наукових досліджень механічного оброблення матеріалів мається широкий спектр методів та програм комп'ютерного моделювання. В той же час майже в усіх випадках проектувальники технології на етапах прийняття принципів рішень не мають можливості застосувати вказані в публікаціях ресурси. Бо для цього потрібно залучати фахівців найвищої кваліфікації, що мають доступ до вельми коштовних програмних продуктів. В цій ситуації виникає необхідність у створенні нового класу програмних продуктів, які будуть мати статус віртуальних приладів.

Окрім того, в сучасних умовах підготовки кваліфікованих фахівців, зокрема для роботи в машинобудівній галузі є потреба у навчальному дистанційному інструментарії дослідження напружень, що виникають під час механічного оброблення виробів машинобудування. Тому метою даної роботи стало створення відповідного віртуального пристрою.

Основна частина. Для вирішення цієї задачі застосовано методи дослідження, які включають аналіз відомих аналітичних залежностей [10], класифікацію параметрів процесу на адекватні вихідні дані та аргументи функції і, нарешті, побудову запропонованого обчислювального ланцюжка для обчислення розподілу напружень. Програмну реалізацію створеного віртуального інструменту здійснено в середовищі NI LabVIEW 7.1.

Вибір вказаного програмного продукту ґрунтується на його наступних позитивних методологічних особливостях [11]:

- програмний комплекс NI LabVIEW (National Instruments Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) є потужним інструментальним засобом для створення графічних програм, що являють собою віртуальні прилади;
- потужне програмне забезпечення надає зручні засоби для розробки складних експериментальних стендів, систем автоматизації та управління, моделювання процесів та інших завдань, що стоять перед сучасною наукою;

– зручність використання завдяки графічному інтерфейсу, можливість створення модульних програм, підтримку безлічі апаратних засобів і платформ, а також широкий спектр інтегрованих інструментів для аналізу даних та візуалізації результатів;

– комплекс є автоматизованою системою наукових досліджень і призначений для проведення наукових досліджень на основі отримання та використання моделей досліджуваних об'єктів, явищ та процесів.

Також було враховано позитивні результати застосування програмного комплексу NI LabVIEW у попередніх дослідженнях авторів даної статті [12–14].

Вихідними даними є раніше опубліковані адекватні емпіричні формули складових сили різання з визначеними показниками і коефіцієнтами. Адекватні вихідні дані, наведені в роботі [10], використані для створення алгоритмічної моделі розрахунку відповідних напружень. Алгоритмічна модель розрахунку напружень, наведена на рис.1. Математичні вирази і графічні процедури, пов'язані з кожним з блоків алгоритмічної моделі вказані після рисунку 1 за кожним блоком.



Рис. 1. Схема алгоритмічної моделі розрахунку розподілу напружень

Блок 1. Початкові дані. Компоненти математичних та графічних моделей складових сили різання P'_z, P'_y, P'_x .

Блок 2–4. Розрахунки P'_z, P'_y, P'_x – технологічних складових зусилля різання для гострого леза ($r = 0, h = 0$). Математичні та графічні моделі мають наступний вигляд:

$$P'_z = 1790 \cdot t^{1,0} \cdot S^{0,75} \cdot V^{-0,15} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{90}\right)^{1,1} \cdot (1+r)^{0,1} \cdot (1+h)^{0,4}, \quad (1)$$

$$P'_y = 809 \cdot t^{0,9} \cdot S^{0,6} \cdot V^{-0,3} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{90}\right)^{2,8} \cdot (1+r)^{0,3} \cdot (1+h)^{1,4}, \quad (2)$$

$$P'_x = 460 \cdot t^{1,0} \cdot S^{0,5} \cdot V^{-0,4} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{90}\right)^{2,4} \cdot (1+r)^{-0,2} \cdot (1+h)^{1,2}. \quad (3)$$

Показники ступеня і значення параметрів приладу наведені нижче в табл. 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів пропорційності C_p

(чисельник: сталь 45, $\sigma_s = 750$ МПа, твердий сплав Т15К6)

(знаменник: сталь 12Х18Н9Т, $\sigma_s = 600$ МПа, твердий сплав ВК8),

та показників степені $x - u$ залежності при $\varphi = \varphi' = 45^\circ$ і сухому різанні [10]

Коефіцієнт C_p для сталі		Показники степені						Складові сили різнання, Н
45	12Х18Н9Т	x	y	$-z$	η	ν	u	
1560	1790	1,0	0,75	0,15	1,1	0,1	0,4	$P_z = 1574/1806$
620	809	0,9	0,60	0,30	2,8	0,3	1,4	$P_y = 487/2636$
437	460	1,0	0,50	0,40	2,4	-0,2	1,2	$P_x = 414/435$

Блок 5. Розрахунки сили різання T і нормальної складової сили різання P'_n

$$P'_n = \sqrt{(P'_y)^2 + (P'_x)^2}, \quad (4)$$

$$T = \sqrt{(P'_z)^2 + (P'_y)^2 + (P'_x)^2}, \quad (5)$$

Підсумовування складових сили різання виконується за правилами додавання векторів.

Блок 6. Графічне моделювання вектори сили різання T і складова сили різання P'_n рис.2.

Графічне моделювання векторів здійснюється з дотриманням масштабу векторів сили.

Блок 7. Розрахунок кута зовнішнього тертя-ковзання ρ_y між стружкою і передньою поверхнею леза A_y

$$\mu_\gamma = (P'_z \cdot \tan \gamma + P'_n) / (P'_z - P'_n \cdot \tan \gamma) \quad (6)$$

показник γ вказаний в таб. 2.

$$\rho_\gamma = \tan^{-1} \mu_\gamma. \quad (7)$$

Кут повинен відповідати величині, яка була використана при розрахунках складових сили різання.

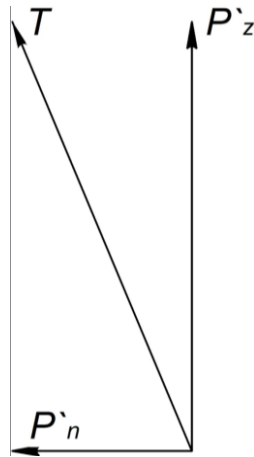


Рис. 2. Вектори сили різання

Блок 8. Графічне моделювання проєкцій векторів сил F_γ, N_γ і визначення кута зовнішнього тертя-ковзання ρ_γ показані на рис. 3.

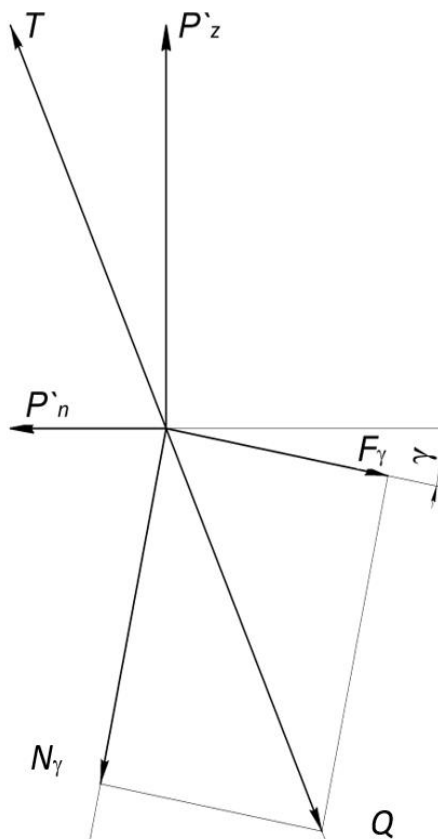


Рис. 3. Графічне моделювання проєкцій векторів сил

Графічне моделювання проекцій векторів сил здійснюється з дотриманням масштабу векторів сил (для перевірки розрахунків проекцій сили різання F_γ та N_γ).

Блок 9. Графічне моделювання кута зсуву ϕ і дотичної проекції T_s сили різання T показано на рис. 4.

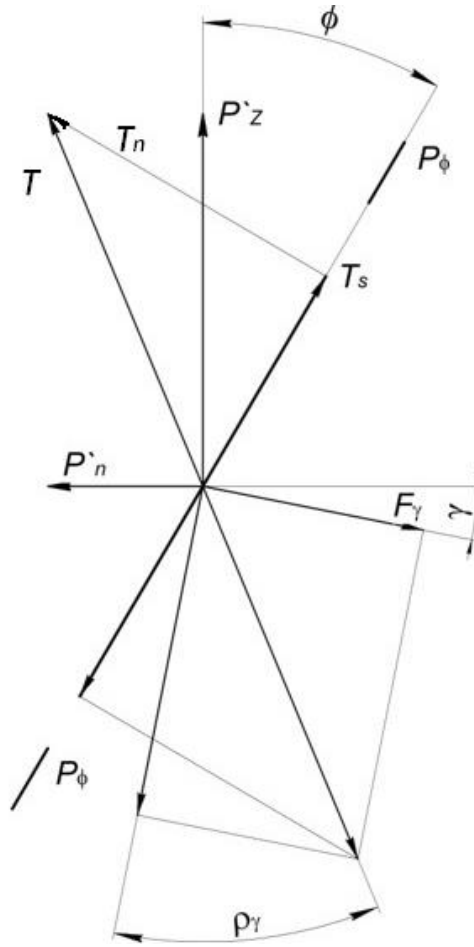


Рис.4. Графічне моделювання кута зсуву ϕ і дотичної проекції T_s

Кут зсуву визначається за відомою формулою розрахунку коефіцієнта потовщення стружки [15]

$$\tan \phi = \cos \gamma \cdot \frac{1}{(K_a - \sin \gamma)}. \quad (8)$$

Блок 10. Обчислення τ_s – середнього значення тангенціальних напружень в площині зсуву

$$T_s = P'_z - P'_n \cdot \tan \phi; \quad l_\phi = a / \sin \phi; \quad b = t / \sin \phi; \quad \tau_s = \frac{T_s}{l_\phi \cdot b},$$

де a – товщина зрізу, мм; b – ширина різання, мм

Блок 11. Обчислення показника степені n

$$n = 2 \cdot \left[l_\gamma \cdot \sin(\rho_s + \phi - \gamma) / (l_\phi \cdot \cos \rho_s) \right] - 1; \quad (9)$$

$$\rho_s = \tan^{-1} \mu_s \quad (10)$$

Виведення наведеної формули можна знайти в роботі [10].

Враховуючи, що всі три складові сили різання P_i обчислюються за однією формулою, але за різних значень параметрів математичної моделі, була створена відповідна уніфікована підпрограма. На рисунку 5 наведено фрагмент уніфікованого програмного коду для розрахунку складової сили різання P_z .

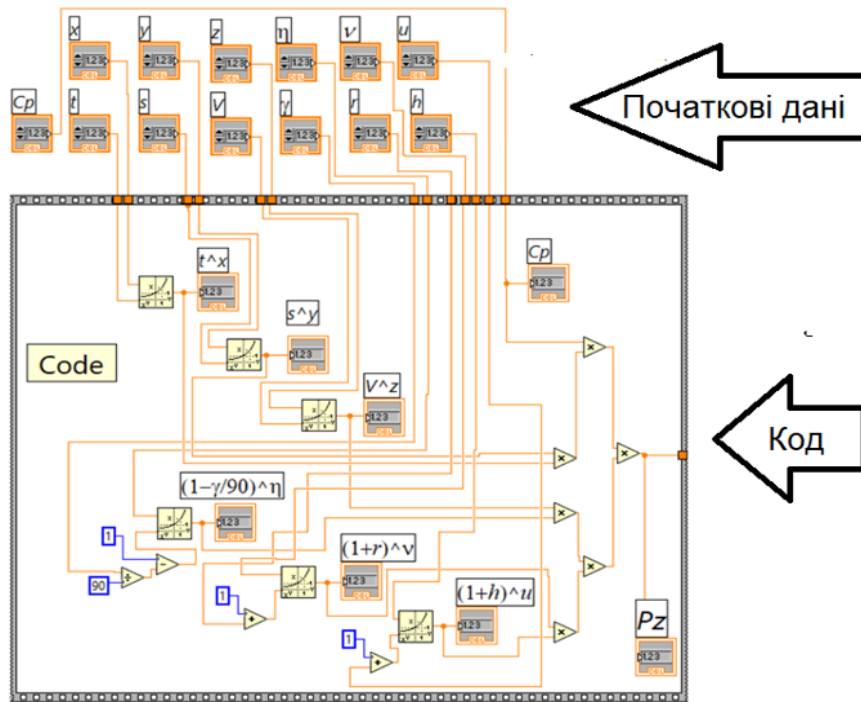


Рис. 5. Програмний код (LabVIEW) блоку розрахунку складової сили різання

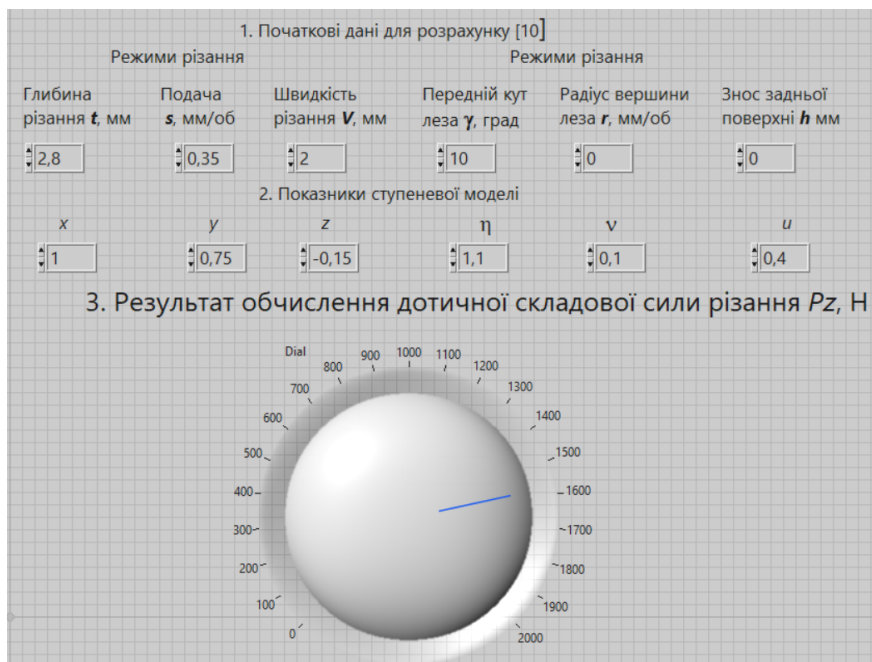


Рис. 6. Фрагмент фронтальної панелі створеного віртуального приладу блоку розрахунку складової сили різання P_z

Результати серії комп'ютерних експериментів, виконаних за допомогою створеного віртуального приладу показані на рис.7–8.

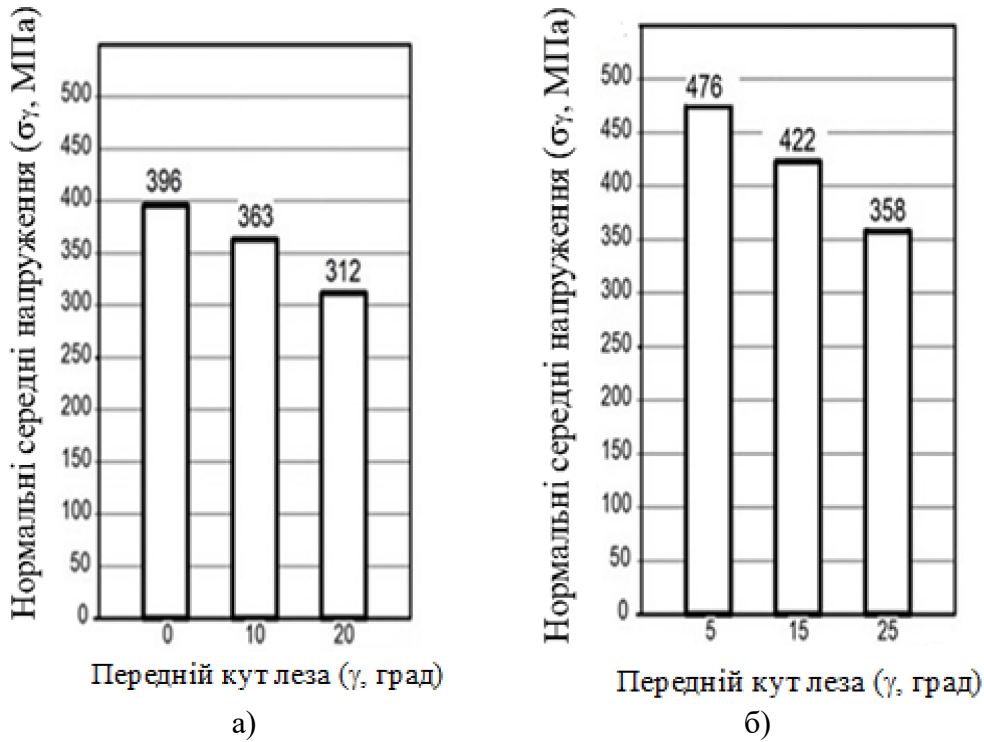


Рис. 7. Залежність нормальних напружень у зоні контакту (σ_{μ} , МПа) від переднього кута леза (γ , град) для: а) сталі 45, б) сталі X18H10T

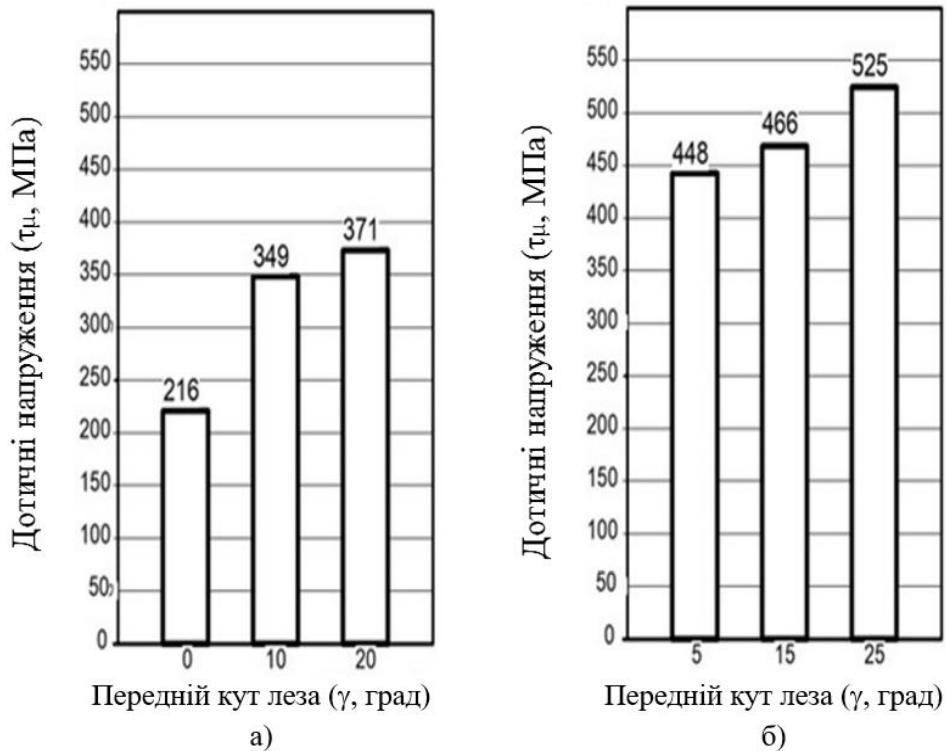


Рис. 8. Залежність дотичних напружень пластичного контакту (τ_{μ} , МПа) від переднього кута леза (γ , град) для: а) сталі 45, б) сталі X18H10T

Висновки.

1. Розраховані за допомогою віртуального приладу величини нормальних та дотичних напружень в зоні контакта стружки з лезом добре співпадають з опублікованими раніше даними.

2. З урахуванням прийнятих обмежень щодо інтервалів значень параметрів процесів механічного оброблення сталі 45 та сталі X18H10T встановлено залежності (у вигляді стовбчастих діаграм) нормальних і дотичних напружень від переднього кута різального леза.

3. Створений віртуальний пристрій для проведення комп'ютерного моделювання напружень у зоні контакта леза зі стружкою впроваджено в навчальний процес при підготовці магістрів та аспірантів за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Перелік посилань

1. Malakizadia, A., Oberbeck, J.N., Magnevall, M., & Krajnik, P. (2019). *A new constitutive model for cutting simulation of 316L austenitic stainless steel. 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations. Procedia CIRP*, 82, 53–58.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.064>
2. Xiaolei, H., Zhiqiang, S., Xuanzhen, C., Shan, P., Yong, P., & Ping, X. (2019). Investigation on the mechanical behavior and constitutive model of 45 steel used in planing energy-absorbing structure at high strain rate and high temperature. *Journal of Rail Way Science and Engineering*, 16(1), 215–222. <https://www.webofscience.com/wos/allldb/full-record/CSCD:6464931>
3. Saleem, W., Ijaz, H., Alzahrani, A., & Zhang, J. (2019). Numerical modelling and simulation of macro- to microscale chip considering size effect for optimum milling characteristics of AA2024T351. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41 (8). <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1838-0>
4. Denkena, B., Kroedel, A., Ellersiek, L., Zender, F. (2021). Modelling of process Forces for Complex multi-axial Turning Processes. *MM Science Journal, Special Issue HSM 2021 16th International Conference on High Speed Machining*, 5023–5029.
https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_11_2021147
5. Pop, A. B., Sandu, A. V., Sachelarie, A., & Țițu, M. A. (2021). Studying the Behavior of the C45 Material when Changing the Tool Geometry Using the Finite Element Method. *Archives of Metallurgy and Materials*, 653–659.
<https://doi.org/10.24425/amm.2022.137802>
6. Kuruc, M., Vopat, T., Peterka, J., Necpal, M., Simna, V. Milde, J., Jurina, F. (2022). The Influence of Cutting Parameters on Plastic Deformation and Chip Compression during the Turning of C45 Medium Carbon Steel and 62SiMnCr4 Tool Steel. *Materials*, 15(2), 585.
<https://doi.org/10.3390/ma15020585>
7. Ribeiro-Carvalho, S., Lauro, C.H., Horovistiz, A., Davim, J.P. (2022). Development of FEM-based digital twins for machining difficult-to-cut materials: A roadmap for sustainability. *Journal of Manufacturing Processes*, 75, 739–766.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.01.027>
8. Storchak, M., Drewle, K., Menze, Ch., Stehle, T. Möhring, H-C. (2022). Determination of the Tool-Chip Contact Length for the Cutting Processes. *Materials*, 15(9), 3264.
<https://doi.org/10.3390/ma15093264>
9. Afrasiabi, M., Saelzer, J., Berger, S., Iovkov, I., Klippel, H., Röthlin, M., Zabel, A., Biermann, D., & Wegener, K. (2021). A Numerical-Experimental Study on Orthogonal Cutting of AISI 1045 Steel and Ti6Al4V Alloy: SPH and FEM Modelling with Newly Identified Friction Coefficients. *Metals*, 11, 1683.
<https://doi.org/10.3390/met11111683>

10. Kravchenko, Yu.H., & Patsera, S.T. (2021). Rozpodil napruzhen na plastychno-pruzhnomu kontakti struzhka-lezo. *Zbirnyk naukovykh prats NHU*, 66, 140–152.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/66.140>
11. *NI's Software Bundle for Engineers in Research, Validation, and Production*. (n.d.).
<https://www.ni.com/en/shop/electronic-test-instrumentation/what-is-test-workflow.html>
12. Derbaba, V.F. (2013). Modelirovanie vlijanija pogreshnostej izmerenija obshhih normalej zub'ev na pokazateli razbrakovki. *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 6(4(66)), 48–52.
13. Patsera, S.T., Korsun, V.I., Derbaba, V.F., & Ruzhyn P.O. (2016). Alhorytm imitatsiino-statystychnoho doslidzhennia kontrolno-vymiriuvanoi systemy ta yoho prohramna realizatsiia u Ni LabVIEW. *Systemy obrobky informatsii. "Metrolohiia"*, 6(143). 116–119.
<http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/16731>
14. Bohdanov, O., Protsiv, V., Derbaba, V. & Patsera, S. (2020). Model of surface roughness in turning of shafts of traction motors of electric cars. *«Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu»*, 1, 41–45
<https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-1/041>
15. Mazur, M.P., Vnukov, Yu.M., Dobroskok, V.L., Zaloha, V.O., Novosolov, Yu.K., & Yakubov, F.Ia. (2011). *Osnovy teorii rizannia materialiv. 2-e vyd. pererob. i dop.* Novyi svit-2000.
<https://xn--e1ajqk.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/12/Mazur-M.-P.-Osnova-teori-rizpotovshennya-materialiv.pdf>

ABSTRACT

Purpose. In modern conditions of training qualified specialists to work in the machine-building industry, there is a need for remote tools for stress research. that arise during the machining of mechanical engineering products. Therefore, the purpose of this work is to create a suitable virtual device.

The methods. The research method includes the analysis of known analytical dependencies, the classification of process parameters into adequate input data and functional arguments, and, finally, the construction of a digitized computational algorithm. The software implementation of the created virtual tool was carried out in the NI LabVIEW 7.1 environment. The choice of this software product is based on the following positive methodological features, such as: a powerful tool for creating graphical programs that represent virtual instruments, convenient tools for developing complex experimental stands, automation and control systems, process modeling and other tasks facing modern science, ease of use due to the graphical interface, the ability to create modular programs, support for a variety of hardware and platforms, as well as a wide range of.

Findings. The values of normal and tangential stresses in the chip-blade contact zone calculated with the help of a virtual device coincide well with the previously published data.

The originality. Considering the accepted restrictions on the intervals of the values of the parameters of the machining processes of steel 45 and steel Cr18N10T, graphs of dependence of normal and tangential stresses on the length of contact of chips with the blade are established.

Practical implementation. The created virtual device for computer modelling of stresses in the contact zone of the blade with chips has been successfully implemented in the educational process for master's and postgraduate students in the specialty 131 Applied Mechanics.

Keywords: metal cutting, computer experiment, LabVIEW.