

© Є.Ю. Щербина¹, В.А. Дербаба¹, П. Неслони²

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

² Політехніка Опольська, Ополь, Польща

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ З СТІЛЬНИКОВОЮ СТРУКТУРОЮ НАДРУКОВАНОЇ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ (SLM)

© Y. Shcherbina¹, V. Derbaba¹, P. Niesłony²

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Opole University of Technology, Opole, Poland

EVALUATION OF MACHINING PARAMETERS OF THE PART WITH A CELLULAR STRUCTURE PRINTED USING SELECTIVE LASER MELTING (SLM) TECHNOLOGY

Мета. Розв'язання науково-технічної задачі, пов'язаної з технологічним забезпеченням механічної обробки надрукованих технологією селективного лазерного плавлення (SLM) деталей з стільниковою структурою із інструментальної сталі шляхом оптимізації режимів різання на токарному верстаті з програмним керуванням.

Методика. Методологічною основою роботи є системний підхід та аналіз вивчення об'єкта досліджень, що ґрунтується на використанні: чисельного та графо-аналітичному методах дослідження з метою встановлення системного зв'язку параметрів точіння з властивостями оброблюваного матеріалу, режимів різання та сил різання. Аналітичне порівняння проводиться по одній перемінній в параметрах режимів різання для встановлення чіткого розуміння ефекту зміни режимних параметрів для токарного верстата.

Результати. Одержані результати досліджень для науково-обґрунтованого підходу полягають у розв'язанні технічної задачі оптимізації параметрів режимів різання для деталей з стільниковою структурою надрукованих за технологією SLM показали певну залежність, що дає розуміння для корекції та оптимізації параметрів режимів різання на токарному верстаті з ЧПК. Отримані дані порівнювались з параметрами режимів різання за принципом однієї змінної, що дає чітке розуміння впливу кожного параметру на результат отриманих даних.

Наукова новизна. Встановлення повного і системного зв'язку параметрів режимів різання з властивостями оброблюваного дизайну деталі та матеріалу для оптимізації технологічного процесу механічної обробки. Аналітико-статистично опрацьовані експериментальні дані, дали змогу вперше одержати комплексні залежності в зручному для аналізу вигляді, які дають наочне уявлення про вплив кожного параметра процесу точіння при складанні раціональної технології механічної обробки надрукованої деталі.

Практична значимість. Полягає у виборі й обґрунтуванні оптимальних параметрів режимів різання для надрукованих деталей з стільниковою структурою, встановленні характеру впливу умов токарної обробки на основні показники процесу – сил різання. Надані практичні рекомендації щодо оптимального вибору параметрів режиму обробки і корекцій режимів різання.

Ключові слова: точіння, верстат, інструментальна сталь, адитивні технології, режими, різання, SLM.

Вступ. Глобалізація розширення адитивного виробництва приводить до більшого використання надрукованих деталей в різних механічних виробках. Якість поверхонь надрукованих деталей як правило не достатня для кінцевого використання в виробках та компенсувати це можна традиційними технологіями. Механічна обробка надрукованих деталей є перспективним напрямком вивчення, так як надруковані деталі можуть мати інші властивості матеріалу ніж традиційні. Механічна обробка складних форм надрукованих деталей достатньо невивчена і на даному етапі є складною технологією для прогнозованого виготовлення виробів.

Деталі надруковані технологією SLM мають хороші механічні властивості. Більшість деталей проходить пост обробку різними методами для доведення таких деталей до бажаної геометричної форми або властивостей матеріалу. На даний час великою популярністю користуються матеріали титанових сплавів та нержавіючій сталі та мають більш велику дослідницьку результативність що показує хорошу практичну цінність. Інструментальна сталь 1.2709 може також друкуватися технологією SLM та має великий потенціал для досліджень [1–9].

Механічна обробка друкованих деталей є актуальною потребою сьогодення, що розширить спектр використання надрукованих деталей. Дизайн стільникових структур рисунок 1 є різноманітний та постійно досліджується в різних умовах використання так і технологічного виготовлення їх можна класифікувати на основі того, що ми називаємо параметрами дизайну.

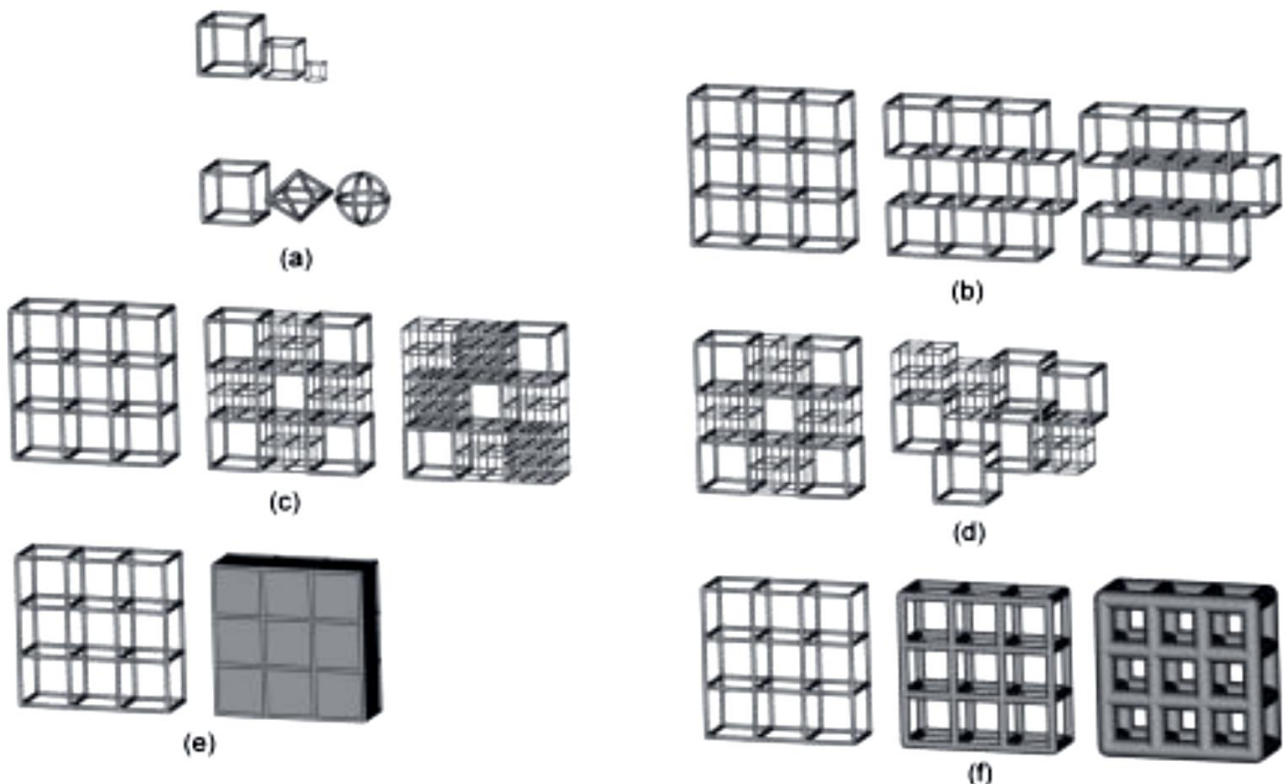


Рис. 1. Дизайн стільникових структур [1]

На рис. 1 вказані параметри, що охоплюють: матеріал, розмір і форму комірок (a), топологію (b), варіабельність розміру комірок (c), 2D- або 3D-періодичний або

стохастичний вигляд (d), тип пористості (відкрита або замкнута коміркова структура) (e), відносну щільність (f) та ієрархічну структуру. Методика підбору технологічного процесу для механічної обробки надрукованих деталей з стільниковою структурою залишається достатньо невивченою, що створює підґрунтя для експериментальних тестів подальшим дослідженням та аналізу отриманих результатів.

Мета роботи і постановка задачі. Досягнення якості поверхні, аналогічної обробці з ЧПК, залишається складним викликом для технологій адитивного виробництва металу. Для того, щоб адитивно виготовлені форми могли використовуватись у виробництві, необхідно враховувати кілька ключових аспектів. Одним з найважливіших є шорсткість поверхні, а також форма, хвилястість і твердість поверхні.

На шорсткість поверхні деталей, виготовлених методом SLM, значний вплив мають різноманітні фактори та параметри процесу. Серед них найбільш значущими є розмір зерна порошкових частинок, товщина шару, кут нахилу стінки та розмір ванни розплаву.

Кут нахилу стінки визначається як кут між заданою поверхнею і горизонтальною площиною. На рисунку 2 показано, як кут нахилу стінки та товщина шару впливають на шорсткість поверхні.

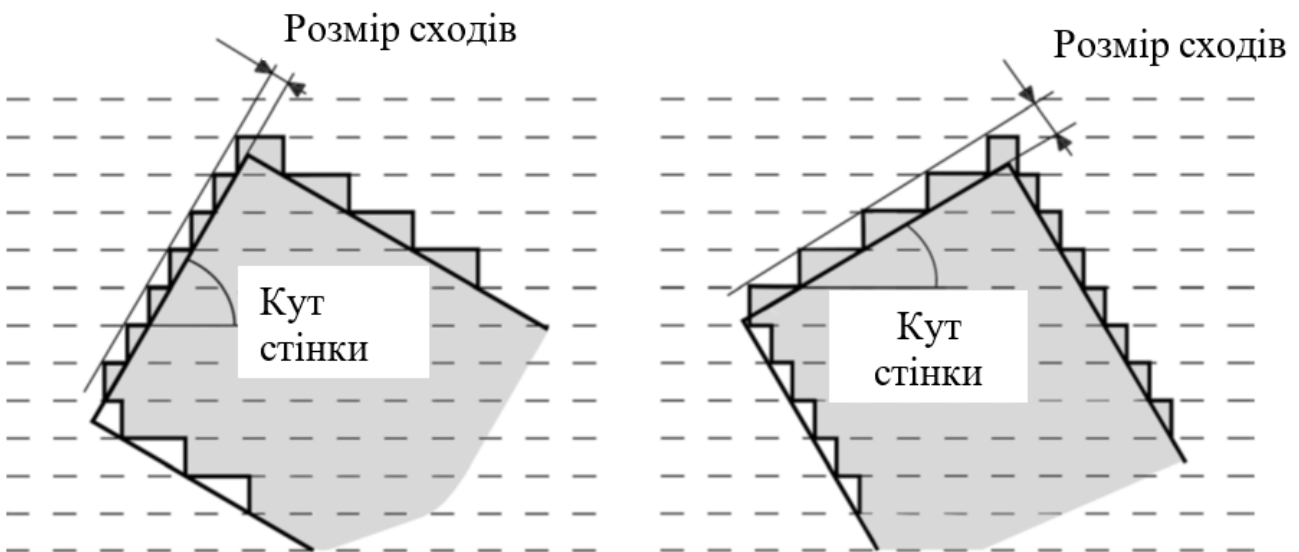


Рис. 2. Вплив кута нахилу стіни на шорсткість поверхні [2]

Взаємодія між кутом нахилу стінки та товщиною шару спричиняє відомий ефект "сходинок". Розмір цих сходинок зменшується пропорційно до косинуса кута нахилу стінки. Таким чином, зменшення товщини шару або збільшення кута нахилу стінки може знизити ефект сходинок.

У кожному з цих випадків, хоча кількість сходинок збільшується, їх розмір зменшується, що покращує якість поверхні. Однак при дуже високих кутах нахилу стінки ($> 75^\circ$) подальше покращення шорсткості не відбувається. Ефект сходинок стає менш значущим, і інші чинники, такі як злипання, можуть навіть дещо підвищити шорсткість.

Шорсткість верхньої поверхні (при 0°) значно знижується при меншій товщині шару. Це відбувається через те, що підвищена теплопровідність і менша кількість порошку сприяють утворенню більш стабільних і дрібних басейнів розплаву.

Вплив товщини шару на шорсткість бічної поверхні (при 90°) є менш помітним. Незважаючи на це, можна досягти гарного перекриття між послідовними шарами навіть при товщині шару 50 мкм.

Поверхні, які прилягають до інших або нависають під кутом менше 60° , зазвичай характеризуються високою шорсткістю. Крім того, поверхні з нахилом менше 40° не можуть бути виготовлені без опорних конструкцій. Погана якість поверхонь на днищі пояснюється двома факторами. По-перше, лазерне сканування порошку замість твердого матеріалу знижує теплопровідність і підвищує температуру, що призводить до утворення нестабільних скупчень розплаву. По-друге, розплавлений матеріал під дією сили тяжіння занурюється в порошок, утворюючи сталактитові візерунки.

Якщо уникнути нависаючих поверхонь з малим кутом нахилу не вдається, рекомендується використовувати спеціальні параметри лазера для перших кількох шарів над такими поверхнями або опорними конструкціями.

Основна частина. Використовуючи сучасну програму *nTop* яка спеціалізується на створінні стільникових структур різного дизайну форм та підготовки заготовок до друку. CAD модель проектується адаптивної форми дизайну заготовки для подальшого точіння на токарному верстаті зовнішнього діаметру. Розміри деталі зовнішнього $\varnothing 80$ мм та шириною 20 мм. Дизайн стільникової структури обраний флюорит з розміром комірки 3 мм та 80% заповненням матеріалом рисунок 3.

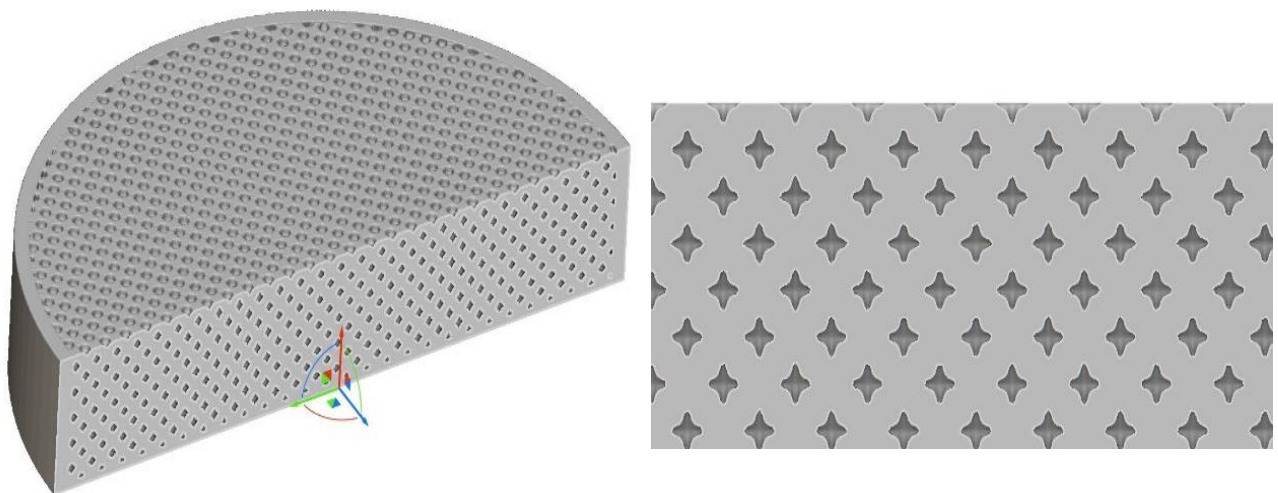


Рис. 3. CAD модель заготовки з стільниковою структурою

Матеріал для друку обирається дисперсний порошок матеріалу Maraging Steel MS1 класифікується ще як 1.2709 (DIN/BS), X3NiCoMoTi18-9-5 (ISO) рис. 4. Машина для друку обрана марки EOSINT M280.

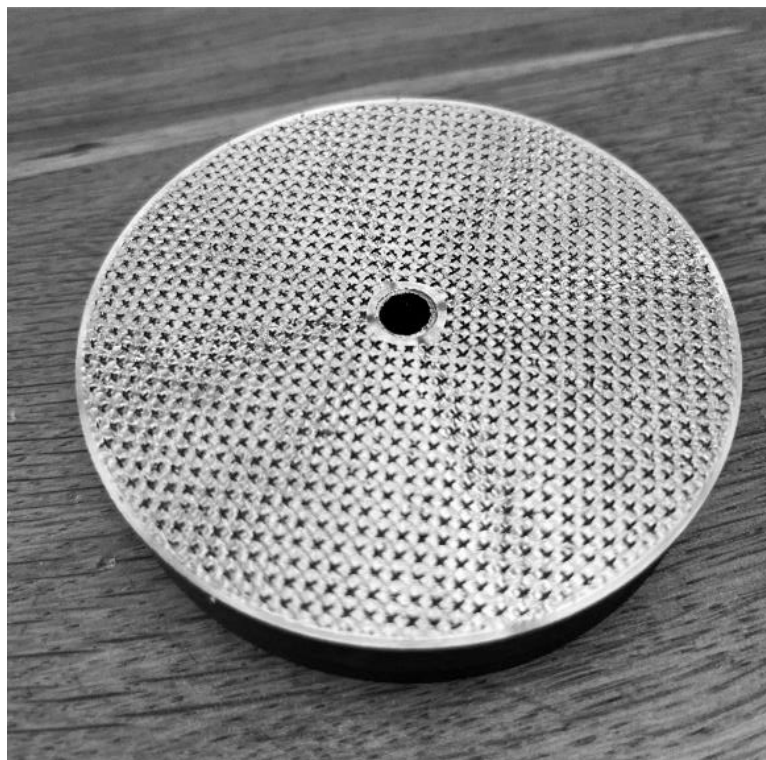


Рис. 4. Надрукована заготовка з стільниковою структурою

Для оцінки поверхневого аналізу використовуємо мікроскоп та оцінюємо якість поверхні заготовки після друку рис. 5. На рисунку чітко видно ефект "сходинок" на виготовленій заготовці методом адитивної технології.

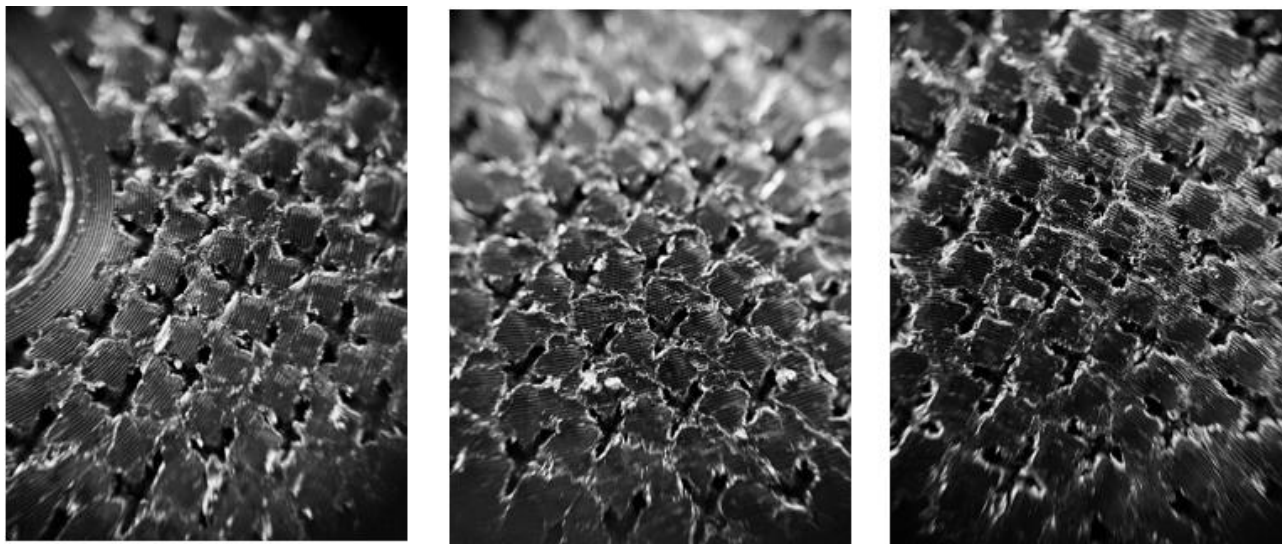


Рис. 5. Надрукована заготовка з стільниковою структурою

На рисунку 6 показано проведену комп'ютерну томографію (КТ) на предмет можливих внутрішніх дефектів деталі таких як тріщини, незаповнені ділянки або пустоти, деформації стільникової структури.

Попередній аналіз показує, що деталь не має деформацій комірчастої структури та має цілком монолітну внутрішню структуру заготовки.

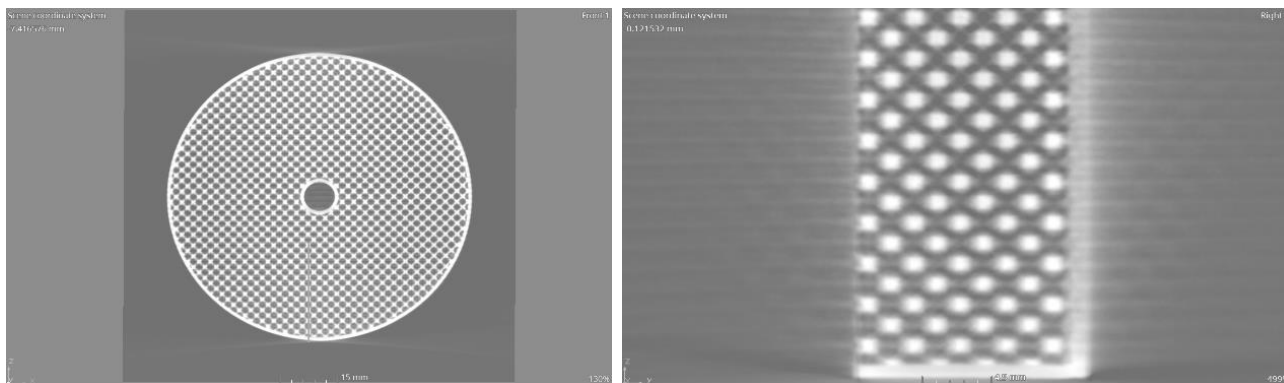


Рис. 6. КТ надрукованої заготовки з стільниковою структурою

При експерименті з точінням заміряються сили різання за допомогою трьох осьового динамометру Kestrel встановленого в супорті токарного верстату з ЧПК. Держка ріжучого інструменту марки MVPNL 2020K16, 251709 20/16 та ріжуча пластина HB 7020 рисунок 7 закріплюються в динамометрі.

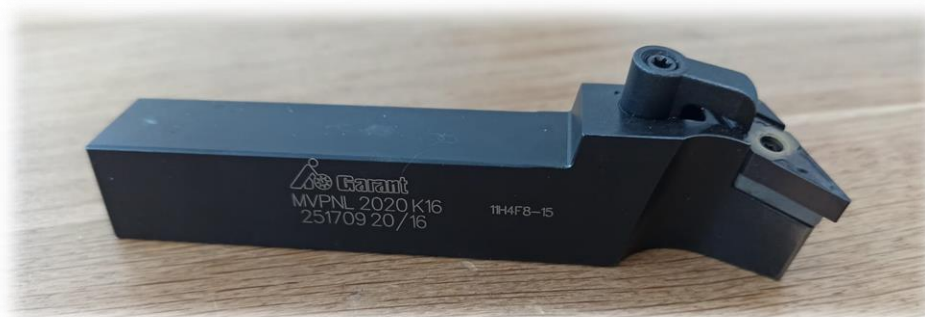


Рис. 7. Ріжучий інструмент

Заготовка закріплюється за внутрішній $\varnothing 7.8$ мм таким чином дає можливість для обробки точінням зовнішнього $\varnothing 80$ мм трьома різними умовами обробки:

- 1) $n = 800$ об./хв., $f = 0,1$ мм/хв., $t = 0.1$ мм;
- 2) $n = 1200$ об./хв., $f = 0,1$ мм/хв., $t = 0.1$ мм;
- 3) $n = 800$ об./хв., $f = 0,1$ мм/хв., $t = 0.2$ мм.

Обробка здійснюється без зміни інструменту чи пластини так як довжина обробки становить всього 20мм. Таким чином вважається, що знос інструменту на ріжучій ділянці інструменту буде мінімальним. Так як загальний припуск з усіх експериментів становить 0,4 мм це дає можливість не друкувати дві інші заготовки для кожного експерименту.

Теоретична формула розрахунку сил різання на токарному верстаті з ЧПК:

$$P_z = 10C_p t^x S_o^y v^n K_p, \text{ Н [8]}$$

де C_p – коефіцієнт пропорційності; K_p – поправковий коефіцієнт, що враховує зміни умови роботи і геометрію різця; x, y, n – показники степеня.

Для обробки масиву даних отриманих від трьох осьового динамометру Kestrel використовується програма MATLAB R2022b. Приклад сила після виводу в графік матиме наступний результат без попередньої обробки даних рисунок 8.

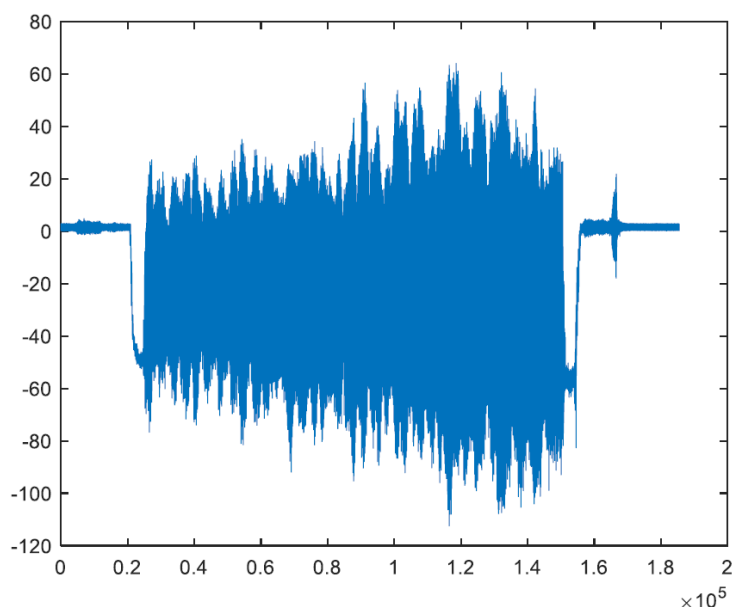


Рис. 8. Приклад процесу запису складової сили F_c

У цьому випадку знаходимо початкову і кінцеву точки і витягується сигнал тільки для цієї області. Ми бачимо, що цей силовий сигнал має великий динамічний аспект тому для того, щоб проаналізувати зміну середніх даних нам потрібно розробити сигнал статистично. В даному випадку використовується просту функцію "movmean" з рухомим вікном у 200 точок. Після виводу однієї сили на графік аналогічно повторюється для наступних двох сил та створюється один графік для першого експерименту рисунок 9.

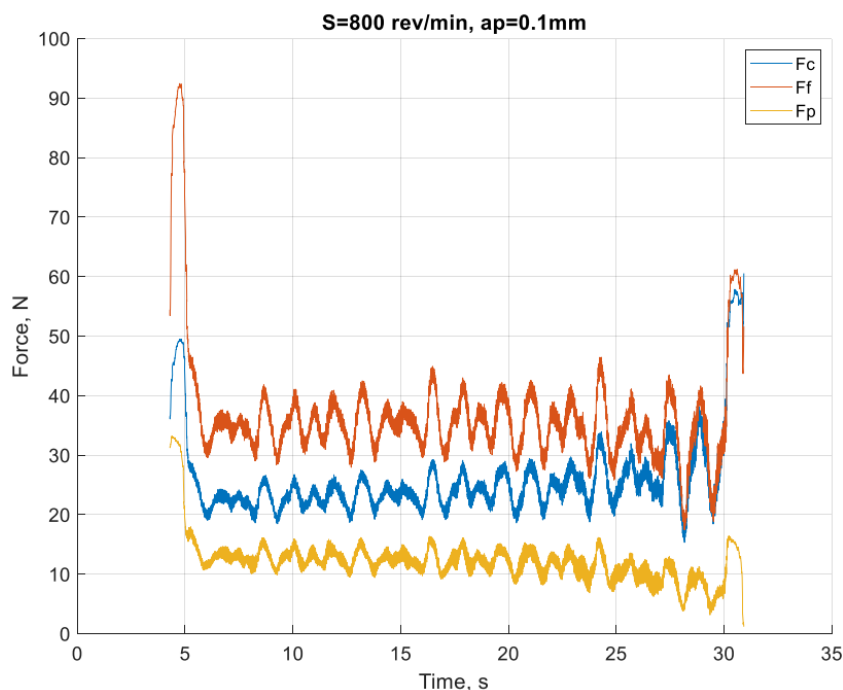


Рис. 9. Графік сил різання першого експерименту

На графіку першого експерименту показані три компоненти сил різання.

Графік другого експерименту показаний на рисунку 10. При порівнянні першого з другим експериментом бачимо більшу стабільність кожної сили на графіку. Дані показники можуть впливати на вібраційні процеси заготовки.

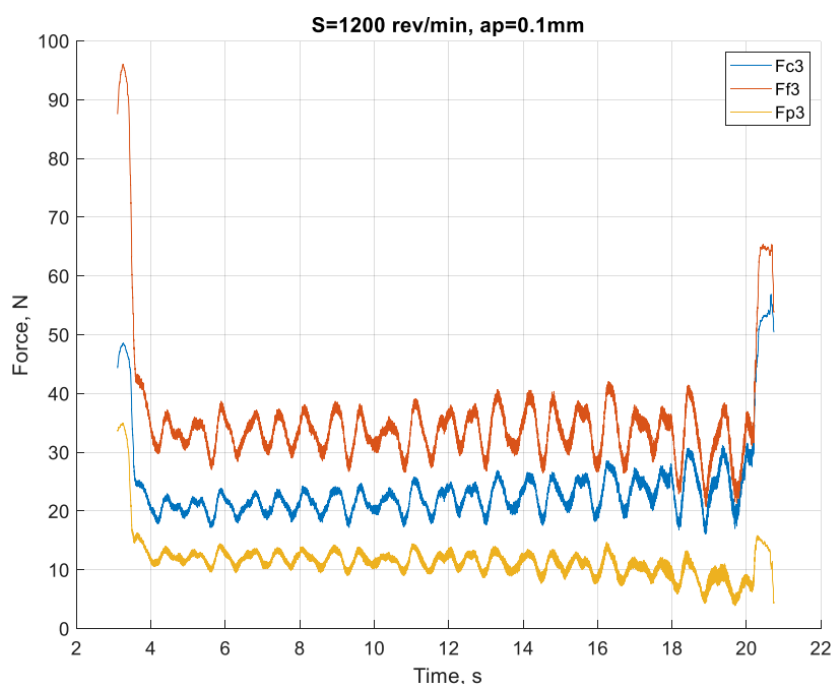


Рис. 10. Графік сил різання другого експерименту

Також відносно зменшилась показники сил в середині графіку при стабільному точінні як мінімальних так і максимальних точок сил різання. Невелике відносне зростання сил можна побачити при початку та закінченню точіння порівняно з першим експериментом.

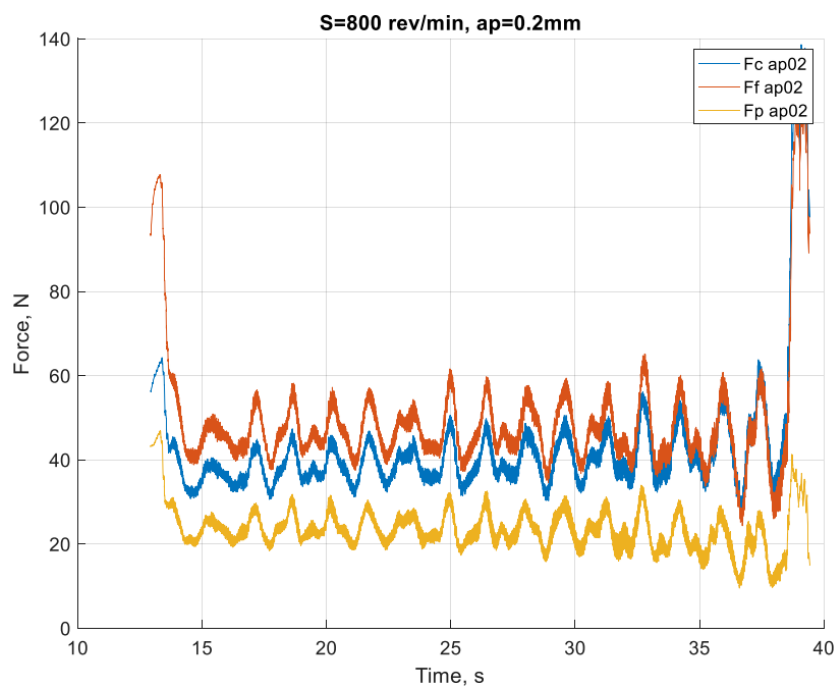


Рис. 11. Графік сил різання третього експерименту

На третьому графіку рисунок 11 третього експерименту видно значне зростання сил різання на всій довжині обробки. Також чітко видно зменшення стабільності даних в середині графіку.

Обговорення. Отже для планування та вибору параметрів обробки для надрізованих деталей з стільниковою структурою достатньо порівняти результати даних з однією змінною. Таким чином зафіксувати вплив певної змінної на кінцевий результат отриманих даних.

Порівняння даних на різну голубину припуску 0,1 мм в першому експерименту та 0,2 мм в третьому експерименту рисунок 12. Дані чітко демонструють що при збільшенні припуску збільшуються сили різання, збільшуються пікові точки сил та зростає нестабільність при точінні.

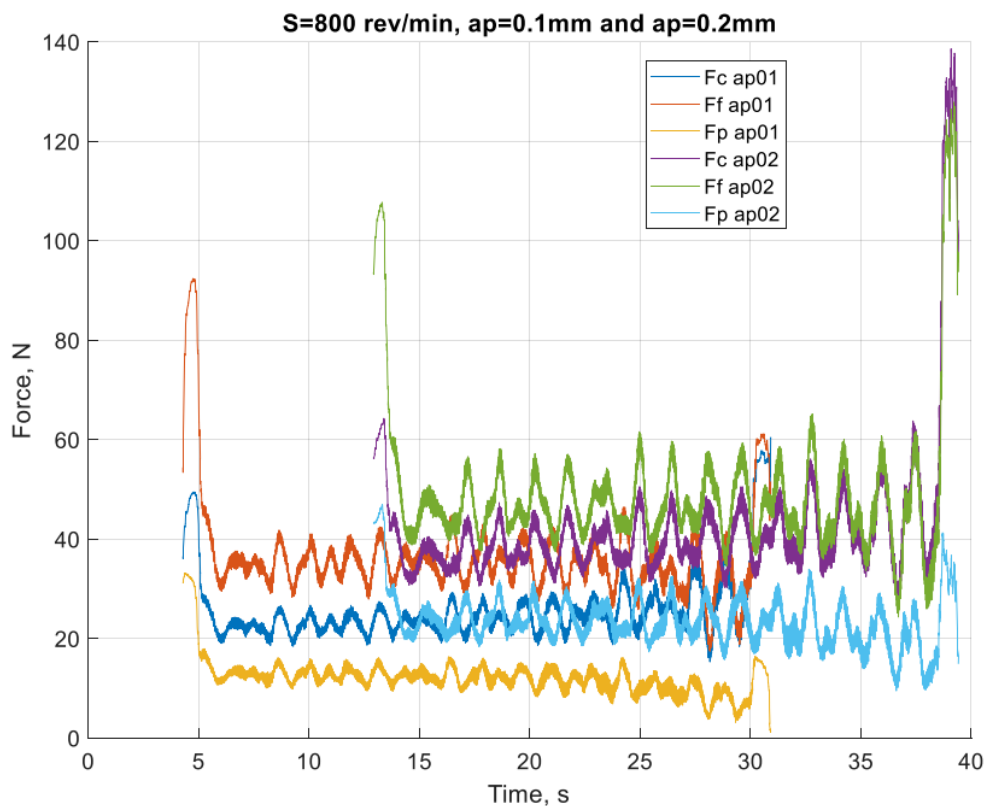


Рис. 12. Порівняння першого та третього експерименту

Потрібно враховувати, що нестабільність очевидно буде виникати в деталях з малим відсотком заповнення матеріалом стільникових структур. В таких випадках вібрації та коливання самої деталі можуть викликати резонанс чого варто уникати при обробці типових деталей.

В другому порівнянні буде обрано за змінну оберти шпинделю 1 200 об./хв в другому експерименті та 800 об./хв в першому експерименті рисунок 13. При збільшенні обертів видно невелике збільшення пікових сил різання при початку та закінченні різання. Порівняння безперервного різання в середині графіку видно значне зменшення сил різання та більшої стабільності графіку в другому експерименті.

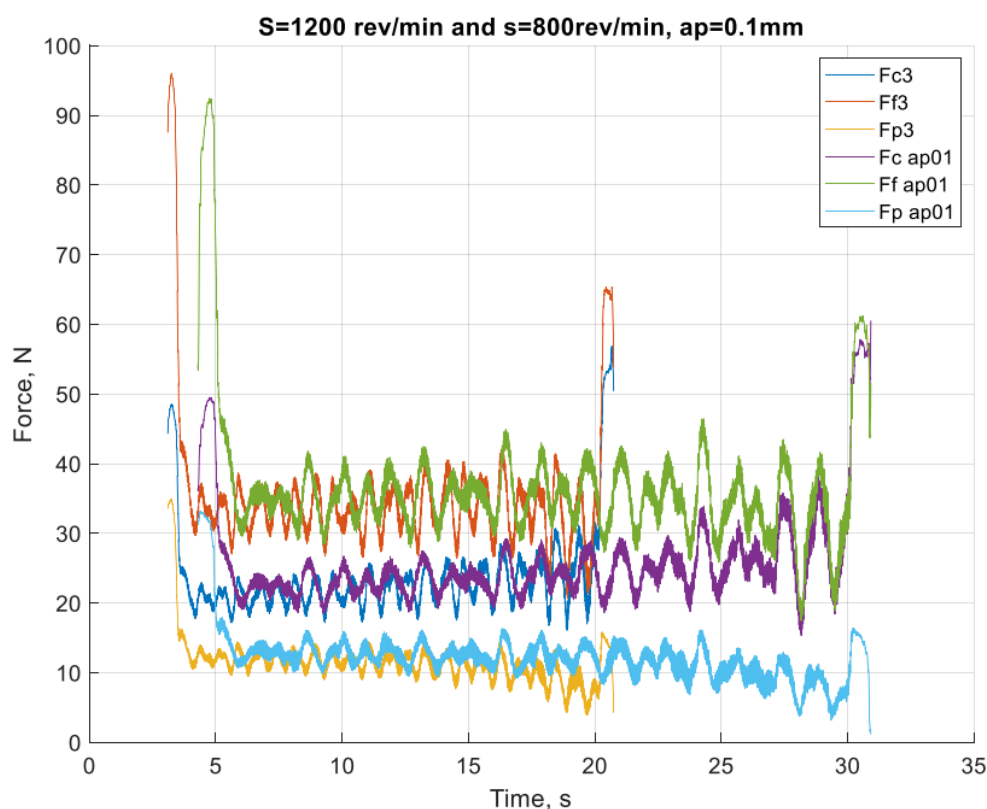


Рис. 13. Порівняння першого та другого експерименту

Висновки.

1. Отримані чисельні результати досліджень для науково-обґрунтованого підходу у розв'язанні технічної задачі токарної обробки надрукованої деталі з комірчастою структурою на верстатах з ЧПК, що містять сукупну аналітичну методику для прогнозування їхньої оброблюваності із забезпеченням оптимальних режимів обробки. Отримані результати порівнювалися з різними режимами різання та надана об'єктивна оцінка для кожного експерименту.

2. Обґрунтований і встановлений повний системний зв'язок параметрів оброблення з властивостями оброблюваного матеріалу, інструментального матеріалу і конструкторсько-технологічних чинників деталі на оптимізацію технології токарної обробки.

3. Виконана методика значно спрощує великі аналітичні розрахунки за класичними методами з купою виправних коефіцієнтів та враховує сучасну геометрію інструментів показники і режимів різання стосовно конкретного дизайну деталі та більш того, може буди адаптована до інших типів деталей з стільниковою структурою типу тіл обертів різних галузей виробництва.

4. Проаналізовані конструктивні особливості дизайну деталі з стільниковою структурою, матеріалу та надана загальна характеристика об'єкта дослідження.

5. Проаналізовано та описана оптимальна технологія механічної обробки деталі з стільниковою структурою. Застосований прогресивний ріжучий інструмент стандарту ISO, оснащення для сучасного багатоцільового верстата з ЧПК. Програмна реалізація і комп'ютерний експеримент з аналізу сил різання механічної обробки реалізований у програмі MATLAB.

6. Надані практичні рекомендації щодо оптимального аналізу сил різання в MATLAB. Коригування результатів даних від трьох осьового динамометру Kestrel для об'єктивної оцінки сил різання та режимних параметрів з подальшим аналізу графоаналітичним методом результатів на стадії підготовки виробництва.

7. Надано приклад створення заготовки з стільниковою структурою в сучасній програмі для підготовки адитивного виробництва nTop. Виконане дослідження дозволяє планувати тести для деталей з стільниковою структурою виготовлених адитивним виробництвом з подальшою механічною обробкою. Сучасна CAD-CAM система дозволяє створювати нестандартні складні стільникові структури, що показує дане дослідження.

Перелік посилань

1. Rehme, O. (2009). *Cellular Design for Laser Freeform Fabrication*.
2. Simoni, F., Huxol, A., & Villmer, F.-J. (2021). Improving surface quality in selective laser melting based tool making. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(7), 1927–1938. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01744-9>
3. Kurzynowski, T. (2019). Metoda projektowania i implementacji technologii selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, (1), 190. <http://www.oficyna.pwr.edu.pl>
4. Ruban, V., Derbaba, V., Bohdanov, O., & Shcherbyna, Y. (2023). Optimization of product processing modes in modeling and programming of machining on machine tools with program control. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 72, 222–238. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.222>
5. Щербина, Є.Ю., Дербаба, В.А. & Козечко, В.А (2022). Критерії стійкості ріжучого інструменту для висошвидкісної обробки. *Збірник наукових праць НГУ*, 67, 77–95. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/67.077>
6. Kravchenko, Yu., & Derbaba, V. (2020). Empirical definition of the shearing angle and chip-edge contact length when cutting. *Збірник наукових праць НГУ*, 63, 123–133. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.123>
7. Проців, В.В., Козечко, В.А., Дербаба, В.А., & Богданов, О.О. (2021). Сучасні полімерні матеріали та технології в 3D-прінтингу. *Збірник наукових праць НГУ*, 65, 107–117. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.107>
8. Д'яченко, Ю., Воронько, І., & Воронько, В. (2023). Методика розрахунку режиму різання для токарної обробки на верстатах із ЧПК. *Grail of Science*, 24, 380–388. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.02.2023.069>
9. Дербаба, В.А., Носачов, В.С., & Різо, З.М. (2021). Дослідження і удосконалення методики випробувань верстата на геометричну і кінематичну точність. *Збірник наукових праць НГУ*, 64, 198–212. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.198>

ABSTRACT

Purpose. Solving a scientific and technical problem related to the technological support of machining of parts with a cellular structure made of tool steel printed by selective laser melting (SLM) technology by optimizing cutting modes on a CNC lathe.

Methods. The methodological basis of the work is a systematic approach and analysis of the object of study, based on the use of numerical and graphical analytical research methods to establish a systematic relationship between turning parameters and the properties of the processed material, cutting modes and cutting forces. The analytical comparison is carried out on one variable in the parameters of cutting modes to establish a clear understanding of the effect of changing the operating parameters for a lathe.

Results. The research obtained results for a scientifically based approach to solving the technical problem of optimizing the parameters of cutting modes for parts with a cellular structure printed using SLM technology showed a certain dependence, which gives an understanding for correcting and optimizing the parameters of cutting modes on a CNC lathe. The data obtained were compared with the parameters of cutting modes on the principle of one variable, which gives a clear understanding of the influence of each parameter on the result of the data obtained.

Scientific novelty. Establishing a complete and systematic connection between the parameters of cutting modes and the properties of the machined part design and material to optimize the machining process. The analytical and statistical processing of the experimental data made it possible for the first time to obtain complex dependencies in a form convenient for analysis, which gives a clear picture of the influence of each parameter of the turning process when developing a rational technology for machining a printed part.

Practical significance. The aim is to select and justify the optimal parameters of cutting modes for printed parts with a cellular structure, to establish the nature of the influence of turning conditions on the main process indicators - cutting forces. Practical recommendations for the optimal selection of machining mode parameters and correction of cutting modes are given.

Keywords: *turning, machine tool, tool steel, additive technologies, modes, cutting, SLM.*