

О.С. ВОДЕННИКОВА, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний університет

М.О. КОВАЛЬ, інж.-конструктор, Компанія «Прогрестех-Україна»

С.А. ВОДЕННИКОВ, д-р техн. наук, проф., Національний університет «Запорізька політехніка»

ВИГОТОВЛЕННЯ АВІАЦІЙНОЇ ДЕТАЛІ «ЗАВИХРУВАЧ» З ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ INCONEL 718 ЗА ДОПОМОГОЮ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Мета. Метою роботи є виготовлення («виращування») деталі «Завихрувач» зі сплаву Inconel 718 за допомогою технології селективного лазерного спікання.

Методи досліджень. Процес адитивного виробництва авіаційної деталі «Завихрувач» характеризувався послідовністю операцій: побудова цифрової 3D-моделі → вибір адитивної технології (технології селективного лазерного спікання) та її реалізація → отримання готової деталі. Побудова цифрової 3D-моделі деталі здійснювалася з використанням програми Unigraphics NX 7.5. Технологія селективного лазерного спікання апробувалася на 3D-принтері типу EOS M400 з використанням в якості вихідних порошкових матеріалів металевих порошоків на основі нікелю компанії Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co., Ltd. («Sino Euro», Китай) та LPW Technology, Ltd («LPW», Великобританія). Дослідні зразки піддавалися операції гарячого ізостатичного пресування з наступною термообробкою відповідно до норм на авіаційно-космічні матеріали ASM 5662M. Хімічний склад сплаву Inconel 718 визначали методом спектрального та хімічного аналізів.

Наукова новизна. Набула подальшого розвитку концепція виготовлення авіаційних деталей зі сплаву Inconel 718 за допомогою технології селективного лазерного спікання з застосуванням тривимірної цифрової моделі (CAD/CAM/CAE-системи).

Практичне значення. Результати досліджень виготовлення деталі «Завихрувач» зі сплаву Inconel 718 за допомогою технології селективного лазерного спікання можуть використовуватися як прототип для виготовлення різних авіаційних деталей, наприклад, деталі «Охолоджуваний сопловий апарат турбіни» як в умовах АТ «Мотор Січ», так і в умовах ДП «Івченко-прогрес».

Результати. Встановлено, що процес виготовлення авіаційної деталі «Завихрувач» з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718 за технологією селективного лазерного спікання характеризується меншими числом технологічних операцій (зменшуються витрати на оснащення і додаткову механічну обробку) та спрощується прототипування виробів. При цьому виготовлена деталь «Завихрувач» володіє на 12–17 % меншою масою в порівнянні з її металевим аналогом.

Ключові слова: жароміцні сплави, авіаційні деталі, адитивне виробництво, 3D-друк, технологія селективного лазерного спікання, Inconel 718, 3D-модель.

doi: 10.31721/2306-5451-2022-1-55-10-15

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Забезпечення експлуатаційної надійності та довговічності авіаційних деталей залишається актуальною проблемою сучасного прикладного матеріалознавства. Так покращення якості та експлуатаційних властивостей металевих виробів (деталей) представляється можливим удосконаленням технології їх виробництва, зокрема з застосуванням сучасних 3D-технологій, та застосуванням нових матеріалів. З розвитком «Четвертої промислової революції» або «Індустрії 4.0» («Industrie 4.0») адитивне виробництво (Additive Manufacturing) стає пріоритетною та «гарячою» темою для різних дослідницьких сфер. Зокрема згідно досліджень [1] «Індустрія 4.0» ґрунтується на дев'яти розробках (результатів) технічного прогресу, серед яких адитивне виробництво (ISO/ASTM Standard 52921-13 [2]) займає восьме місце. Адитивні технології роблять процес топологічної оптимізації конструкцій найбільш ефективним, дозволяючи виробляти конструкції практично будь-якої геометричної форми [3].

Тому у роботі запропоновано розглянуто як альтернативу традиційним методам отримання авіаційних деталей застосування адитивного виробництва, яке дозволяє за даними тривимірної цифрової моделі (CAD/CAM/CAE-системи) створювати складнопрофільні конструкції з високими механічними та експлуатаційними характеристиками.

Аналіз досліджень і публікацій. Відомо, що жароміцні нікелеві сплави широко використовуються для деталей ракетних та авіаційних газотурбінних двигунів, до яких висувають наступні вимоги [4]: висока щільність і герметичність, відсутність пористості, стабільність розмірів, високий комплекс фізико-механічних характеристик, жароміцність, жаротривкість та довговічність. Безпосередньо для жароміцних нікелевих сплавів, комплекс механічних властивос-

тей яких визначається термічною обробкою, що викликає дисперсійне твердіння, надзвичайно важливо забезпечувати належну термічну обробку, що включає аустенізацію і теплове старіння при певних температурах. Властивості таких сплавів можуть значно змінюватися при дії на них температур, що призводять до зміни усталеного при старінні рівноваги різних фаз [5].

При виготовленні авіаційних деталей широкого застосування набув жароміцний сплав Inconel 718 (Alloy 718, UNS N07718, 2.4668). Inconel 718 володіє підвищеною міцністю та корозійною стійкістю, в поєднанні з простою оброблюваністю і легкістю зварюваності, при цьому серед його основних властивостей слід виділити невідчужуваність корозійним пошкодженням на ділянках зварних швів та велику міцність на розрив при температурних режимах, що досягають 700 °C [6].

Принцип 3D-друку – це створення об'єкту шляхом пошарового нанесення матеріалу, поступово повторюючи контури виробу. Фактично це повна протилежність стандартним методам – фрезеруванню та тошінню, де деталь формується за рахунок видалення зайвої частини заготівлі (рис. 1) [7].

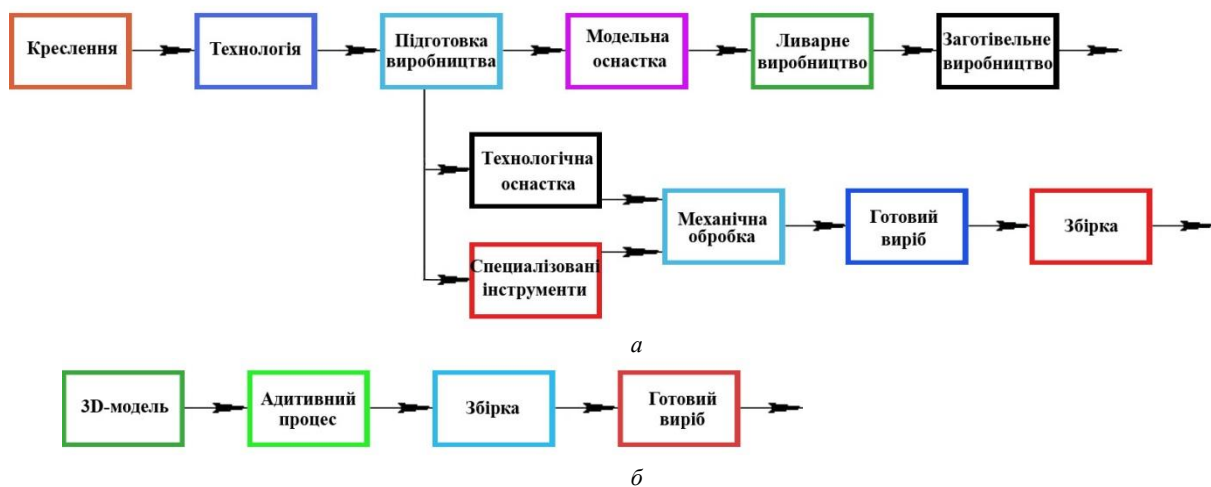


Рис. 1. Порівняння етапів виготовлення деталі згідно традиційного (а) та адитивного (б) виробництва

За допомогою адитивного виробництва, зокрема технології селективного лазерного спікання (Selective Laser Sintering (SLS)) представляється можливим вирішення широкого спектру завдань: від швидкого прототипування до виробництва в малих обсягах, виготовлення обмежених пробних партій або створення виробів на замовлення [8]. При цьому слід зазначити переваги SLS [9]: велика область побудови в 3D-принтерах, висока якість 3D-друку, відсутність необхідності в побудові підтримок, висока швидкість і продуктивність, можливість виготовлення готових виробів.

Постановка завдання. Метою роботи є виготовлення («вирощування») деталі «Завихрувач» зі сплаву Inconel 718 за допомогою технології селективного лазерного спікання.

Викладення матеріалу та результати. У роботі розглядається можливість за допомогою адитивного виробництва виготовлення авіаційних деталей (зокрема деталі «Завихрувач») зі жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718. Процес «вирощування» авіаційної деталі «Завихрувач» за технологією селективного лазерного спікання передбачає передачу віртуальної геометричної моделі на обладнання, яке потім перетворює її в готовий виріб.

Спочатку було побудовано цифрову 3D-модель, використовуючи програму Unigraphics NX 7.5 [10, 11]. Створюване геометричне тіло – деталь «Завихрувач» відноситься до твердого тіла, при цьому моделювання представляє собою створення замкнутого геометричного об'єкту, що описує геометрію деталі. Для цього використовуються примітиви, одержувані витягуванням та обертанням плоских контурів, конструктивні елементи та логічні операції комбінування тіл.

Побудова тривимірної моделі деталі у середовищі NX7.5 починається з створення ескізу деталі (рис. 2), використовуючи команду «Ескіз у середовищі задач» («Sketch in Task Environment»).

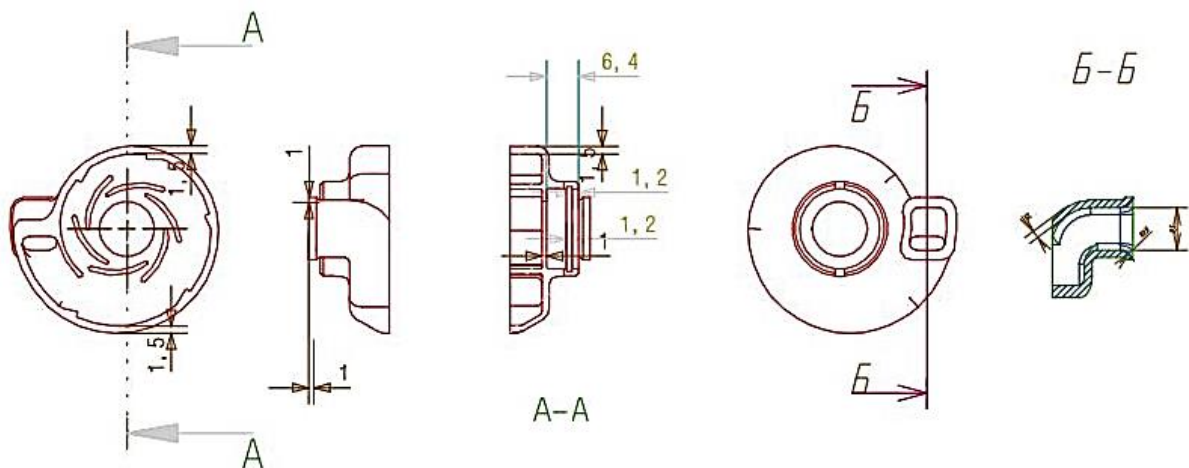


Рис. 2. Ескіз авіаційної деталі «Завихрувач», зроблений в програмі Unigraphics NX 7.5

Побудова цифрової 3D-моделі (рис. 3) дозволяє виконати моделювання деталі «Завихрувач» в напрямках X, Y, Z. В якості вихідних даних для побудови цифрової 3D-моделі використовували значення геометричних розмірів серійної деталі, температурний режим роботи вузла, показники жаростійкості, жароміцності, теплопровідності сплаву та інші показники. При використанні команди «Обертання» («Revolve») необхідно вказати ось повернення і точку початку для отримання тіла повороту поворотом на заданий кут вибраного ескізу (рис. 4). Під час проєктування вносилися зміни у вихідну геометрію через дерево побудов. Практично всі операції в дереві побудов моделей базуються на одному або кількох попередніх елементах, як явно, так і неявно. З однієї сторони це дає використовувати всі переваги параметризації, а з іншої – непередумана прив'язка елементів друг на друга може виправити логіку побудов моделі. По завершенні до моделі деталі «Завихрувач» проводиться перевірка з використанням візуальних звітів. Після завершення перевірки заповнюється список у розділі «Результати» («Preview»), а на зображенні моделей у графічній області з'являються графічні теги із зображенням результатів.

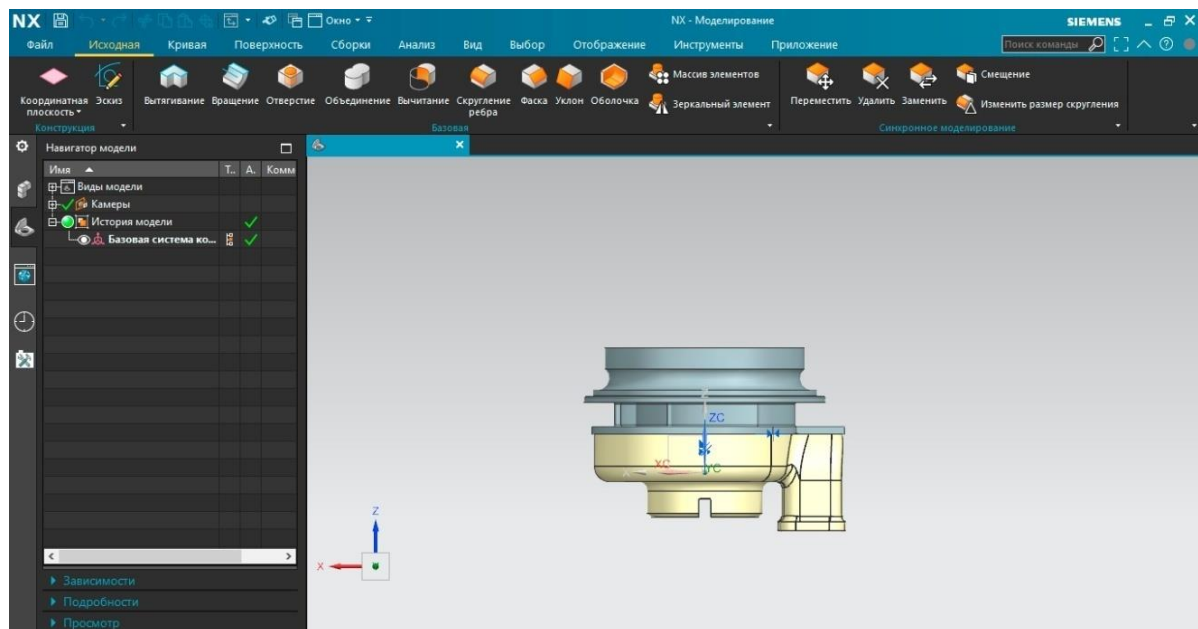


Рис. 3. Побудова цифрової 3D-моделі авіаційної деталі «Завихрувач» (деталь у збірці) у програмі Unigraphics NX 7.5

Експериментальні дослідження проводили в умовах АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), використовуючи 3D-принтер типу EOS M400. В якості вихідних порошкових матеріалів використовували металеві порошки на основі нікелю компаній Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co., Ltd. («Sino Euro», Китай) та LPW Technology, Ltd («LPW», Великобританія).

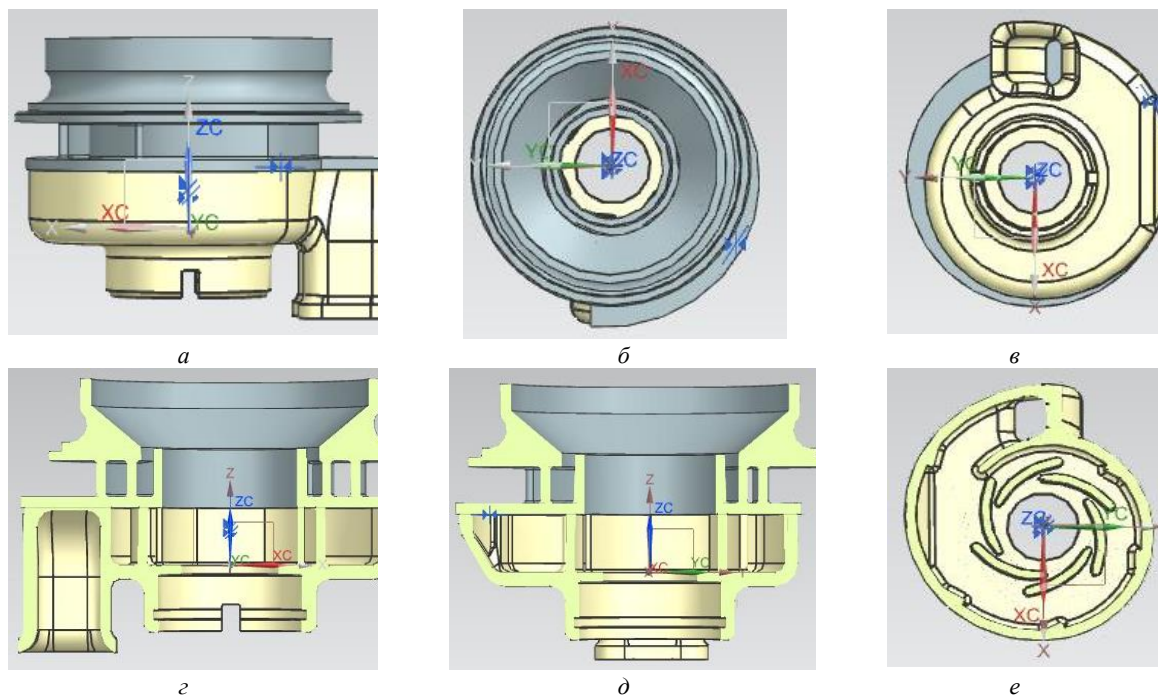


Рис. 4. Цифрова 3D-модель авіаційної деталі «Завихрувач»: а – вид деталі збоку; б – вид деталі зверху; в – вид деталі знизу; г – перетин по осі X; д – перетин по осі Y; е – перетин по осі Z

Процес гарячого ізостатичного пресування проводили згідно з наступним режимом [12]:

початковий тиск – 25 (± 5) МПа;

нагрів зі швидкістю 8–10 $^{\circ}\text{C}/13\text{в.}$ до температури 1040 (± 10) $^{\circ}\text{C}$ (витримка на протязі 1 години), робочий тиск в посуді високого тиску 120 МПа;

нагрів зі швидкістю 3–5 $^{\circ}\text{C}/13\text{в.}$ до температури 1150 (± 10) $^{\circ}\text{C}$ (витримка на протязі 3–4 годин), робочий тиск в посуді високого тиску 160 МПа;

швидкість охолодження до температури 800 $^{\circ}\text{C}$ $\rightarrow$ 60–100 %, далі – не регламентовано.

Термічну обробку після операції гарячого ізостатичного пресування виконували в динамічному вакуумі згідно з наступним режимом [12]:

відпал на твердий розчин під впливом температури 954 $^{\circ}\text{C}$ на протязі 1 години на 25 мм товщини $\rightarrow$ охолодження в потоці аргону;

старіння при температурі 718 $^{\circ}\text{C}$ на протязі 8 годин $\rightarrow$ повільне охолодження в печі до температури 621 $^{\circ}\text{C}$ на протязі сумарного часу зміцнення 18 годин $\rightarrow$ охолодження в потоці аргону.

Аналіз хімічного складу сплаву Inconel 718, отриманого за технології селективного лазерного спікання, показав на відповідність хімічного складу нормам ASM 5662M (50–55 % Ni, 17–21 % Cr, 2,8–3,3 % Mo, 0,2–0,8 % Al, 0,65–1,15 % Ti, 4,75–5,5 % Nb, $\leq 0,35$ % Mn, $\leq 0,35$ % Si, $\leq 0,006$ % B, $\leq 0,015$ % S, $\leq 0,015$ % P, $\leq 0,08$ % C).

Порівняння механізму «виросування» авіаційної деталі «Завихрувач» за технологією селективного лазерного спікання та отримання деталі шляхом механічної обробки показало, що технологія селективного лазерного спікання характеризується меншими числом технологічних операцій (зменшуються витрати на оснащення і додаткову механічну обробку) та спрощується прототипування виробу, при цьому виготовлена деталь «Завихрувач» володіє на 12–17 % меншою масою в порівнянні з її металевим аналогом (рис. 5).

Аналіз досліджень [13–15] показав, що механічні властивості (тривала міцність, границя міцності, умовна границя текучості, відносне подовження, відносне звуження, ударна в'язкість та твердість по Брінеллю) сплаву Inconel 718, отриманого як з порошку фірми «LPW», так і з порошку фірми «Sino Euro» відповідають нормам ASM 5662M (як в горизонтальному напрямку XY, так і в вертикальному напрямку Z). Аналізуючи жароміцні властивості термооброблених зразків зі сплаву Inconel 718 встановлено, що час до руйнування зразків з порошків компаній «LPW» та «Sino Euro» в вертикальному напрямку Z в 1,9 та 1,4 рази вище відповідно, ніж в горизонтальному напрямку XY; для зразків з порошку компанії «Sino Euro» в порівнянні зі

зразками з порошку компанії «LPW» час до руйнування у 3,2 та 2,4 рази більше у горизонтальному напрямку XY та вертикальному напрямку Z відповідно.

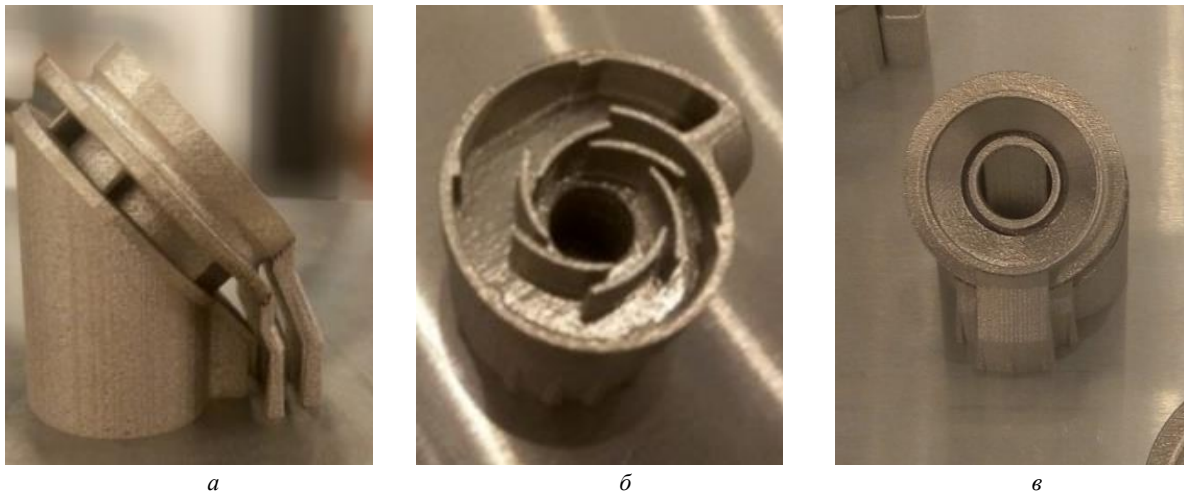


Рис. 5. Авіаційна деталь «Завихрувач», отримана шляхом механічної обробки: *а* – вид деталі збоку; *б* – вид деталі зверху; *в* – вид деталі спереду

Висновки та напрямок подальших досліджень. Показана можливість виготовлення («вироснування») авіаційних деталей на прикладі деталі «Завихрувач» з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718 за технологією селективного лазерного спікання. Аналіз технологічних аспектів виготовлення деталі «Завихрувач» за допомогою адитивного виробництва показує на менше число технологічних операцій на виготовлення «складної» за геометричною конфігурацією деталі; зменшення до 6 разів браку готової деталі; зменшення матеріальних витрат на оснащення і додаткову механічну обробку; зниження до 12–17 % маси деталі в порівнянні з її металевим аналогом, отриманим шляхом механічної обробки.

У подальших дослідженнях доцільно розглянути питання «вироснування» деталі «Охолоджуваний сопловий апарат турбіни» з жароміцного сплаву Inconel 718 за технологією селективного лазерного спікання.

Список літератури

1. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries / Michael Rüßmann, M. Lorenz, P. Gerbert, Manuela Waldner, Jan Justus, Pascal Engel, Michael J. Harnisch [Електронний ресурс]. – 2015. – Режим доступу: https://inovasyon.gen.tr/images/Haberler/bcgperspectives_Industry40_2015.pdf
2. ASTM International. ISO/ASTM Standard 52921-13: Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies, 2013.
3. Дорошенко В.С. Про практику адитивного виробництва в ливарництві та засоби лабораторного відпрацювання піщаних формувальних чи стрижневих сумішей для цього / В.С. Дорошенко // Метал та лиття України. – 2022. – № 1(30). – С. 60–65. С. 62–68. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.062>
4. Підвищення структурної стабільності та властивостей жароміцних нікелевих сплавів для лопаток ГТД обробкою наноматеріалами / М.В. Грекова, Н.Є. Калініна, В.Т. Калінін та ін./Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – №8(152). – С. 60–65.
5. Нікелевий жароміцний сплав [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: <http://techtrend.com.ua/index.php?newsid=13195>
6. Alloy 718 / Inconel 718 / UNS N07718 / 2.4668 [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: https://emk24.ru/wiki/nikel_i_ego_splavy/alloy_718_inconel_718_n07718_4330575/
7. Группа «Деловой профиль». Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу: <http://www.cadcamcae.lv/N141/42-51.pdf>
8. Руководство по 3D-печати методом селективного лазерного спекания (SLS) [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: <https://formlabs.com/ru/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
9. Селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering, SLS) [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: <https://pro3d.com.ua/a368590-selektivne-lazerne-spikannya.html>
10. Иванов А.В., Заложных И.С., Барбаров К.О. Основы построения трехмерных моделей деталей ракетных двигателей в среде NX7.5: учебное пособие. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2014. – 156 с.
11. Данилов Ю., Артамонов И. Практическое использование NX. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 332 с.
12. Воденнікова О.С. Вирощування авіаційної деталі «Завихрувач» з жароміцного сплаву Inconel 718 за технологією селективного лазерного спікання / О.С. Воденнікова, М.О. Коваль, С.А. Воденніков // Науково-технічний

13. **Коваль М.О.** Дослідження механічних властивостей та структури сплаву IN718, отриманого методом 3D-принтингу / М.О. Коваль, О.С. Воденнікова // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – №3. – С. 21–29.
<https://doi.org/10.32620/aktt.2020.3.03>

14. **Vodennikova O.S.** Investigation of Mechanical Properties and Structure of Inconel 718 Alloy Obtained by Selective Laser Sintering from Powder Produced by 'LPW' / O.S. Vodennikova, M.O Koval., S. A. Vodennikov // *Metallophysics and Advanced Technologies*. – 2021. – Vol 43. – Issue 7. – pp. 925–937.
<https://doi.org/10.15407/mfint.43.07.0925>

15. **Vodennikova O.** Selective laser sintering technology is to be used in order to obtain aviation unit application / O. Vodennikova, M. Koval., S. Vodennikov // *METAL 2021 : 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials: Conference Proceedings* (May 26–28, 2021, Brno, Czech Republic, EU). – 2021. – pp. 543–549.
<https://doi.org/10.37904/metal.2021.4156>

УДК 004.4:622.142:622.271

О.С. ЗЕЛЕНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., В.С. ЛИСЕНКО, канд. екон. наук, доц.
Державний університет економіки і технологій

ВДОСКОНАЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОКОНТУРЮВАННЯ СОРТІВ РУД ПО ГОРИЗОНТАХ РУДНИХ КАР'ЄРІВ

Мета. Метою роботи є вдосконалення оцінки просторової мінливості вмісту вибраних показників на основі побудови ізоліній, а також виділення рудних тіл з урахуванням встановлених кондицій.

Методи дослідження. Наводиться новий розроблений модуль оконтурювання рудних тіл, що дозволяє оцінити мінливість показників по горизонтах кар'єру. При цьому заданий контур гірничих робіт покривається регулярною інтерполяційною сіткою. По даним інтерполяції будуються три поверхні різними способами: інтерполяційні, каркасні, а також на основі В-сплайнів (NURBS-поверхні). Відносно цих поверхонь формуються ізолінії з заданим кроком. Із сукупності контурів ізоліній вибирається контур по умовам кондицій, який являє собою оконтурювання рудного тіла. По двом показникам таких контурів будується два, та їх перетин дозволяє оцінити результуючий контур, який задовольняє вибраним кондиціям по цим двом показникам.

Наукова новизна. Для складно структурних родовищ більш прийнятними моделями побудови поверхонь є інтерполяційні, каркасні та на основі В-сплайну (NURBS-поверхня). З цих моделей найбільш ефективні NURBS-поверхні. Тут при корегуванні вхідних даних змінюється тільки найближча до цих даних область поверхні. NURBS-поверхня є керованою, можна змінити характер проходження поверхні відносно контрольних точок, змінюючи вагу їх впливу, що дозволяє моделювати переходи між сортами руд або між рудним тілом та порожньою породою.

Практична значимість. Авторами багато років розроблялась, вдосконалювалась та впроваджувалась багато-модульна автоматизована система геолого-маркшейдерського забезпечення (ГМЗ). Це повною мірою використовується в оновленому модулі оконтурювання сортів руд по горизонтах рудних кар'єрів. У першому варіанті модуль було впроваджено на підприємстві "Ерденет" (Монголія), що розробляє мідно-молібденове родовище. Новий варіант розроблено для умов залізрудних родовищ. Він наводиться на прикладі Південного гірничо-збагачувального комбінату (АТ «ПВДГЗК»).

Результати. Програмне забезпечення розроблене у середовищі Microsoft Visual Studio 2019 на базі бібліотеки MFC (Microsoft Foundation Classes) з використанням технології ADO (ActiveX Data Object) для обробки баз даних та бібліотеки OpenGL для роботи з 3D-графікою із застосуванням шейдерів, що забезпечує високу оперативність виведення 3D-графіки.

Ключові слова: В-сплайн, NURBS-поверхня, оконтурювання рудних тіл, ізолінії, OpenGL.

doi: 10.31721/2306-5451-2022-1-55-15-24

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Планування гірничих робіт є однією з важливих задач при управлінні рудним кар'єром. Оконтурювання сортів руд по горизонтах кар'єру з урахуванням оцінки мінливості якісних показників, значною мірою впливає на ефективність планування гірничих робіт.

Метою роботи є вдосконалення оцінки просторової мінливості вмісту вибраних показників на основі побудови ізоліній, а також виділення рудних тіл з урахуванням встановлених кондицій. Суть методу полягає в побудові поверхонь за даними опробування свердловин та їх перерізами горизонтальними площинами із заданим кроком. При оконтурюванні рудних тіл поверхня перетинається по бортовому змісту.