

УДК 669.295: 620.22

## АНИЗОТРОПІЯ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗРАЗКІВ ЗІ СПЛАВУ Inconel 718, ОТРИМАНИХ 3D-ДРУКОМ

В. В. УСОВ<sup>1</sup>, Н. М. ШКАТУЛЯК<sup>1</sup>, Д. В. ПАВЛЕНКО<sup>2</sup>, О. М. ТКАЧУК<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського, Одеса;

<sup>2</sup> Національний університет "Запорізька політехніка";

<sup>3</sup> Відокремлений структурний підрозділ "Одеського технічного фахового коледжу  
Одеського національного технічного університету"

Досліджено анізотропію пружних властивостей сплаву Inconel 718, отриманого методом 3D-друку (селективне лазерне спікання) з порошків, залежно від його напрямку. Оцінено вплив вихідної (стартової) порошкової суміші та подальшої термічної обробки (post-treatment) на анізотропію пружних властивостей сплаву. Виявлено, що запропоновані види оброблення дають можливість її знизити. Наведено результати теоретичного оцінювання модулів пружності, зсуву, коефіцієнта Пуассона та їх анізотропії в горизонтальному та вертикальному напрямках побудови за пружними константами монокристала та характеристиками текстури, визначеними за допомогою дифракції рентгенівських променів. Встановлено, що теоретичні значення відхиляються від відповідних експериментальних у межах похибки 6...10%. За результатами оцінки пружних властивостей та їх анізотропії вдається підвищити точність розрахунку напружено-деформованого стану та оптимізувати стратегію 3D-друку складнопрофільних деталей зі сплаву Inconel 718.

**Ключові слова:** жароміцний сплав, 3D-друк, селективне лазерне спікання, термічна обробка, гаряче ізостатичне пресування, рентгенівська дифракція, полюсні фігури, модуль пружності, анізотропія.

The anisotropy of the elastic properties of Inconel 718 alloy produced by 3D printing (selective laser sintering) from powders was studied depending on the direction of 3D printing. The influence of the initial powder mixture and the subsequent heat treatment (post-printing treatment) on the anisotropy of the elastic properties of the alloy was evaluated. It is shown that the proposed treatments can reduce the anisotropy of the elastic properties of the alloy. The results of theoretical estimation of the elastic and shear moduli, Poisson's ratio, and their anisotropy in the horizontal and vertical directions of 3D printing are presented, using elastic constants of the single crystal and texture characteristics determined by X-ray diffraction. It is shown that the obtained theoretical values deviate from the corresponding experimental ones by 6...10%. The results of estimating elastic properties and their anisotropy can be used to improve the accuracy of calculating the stress-strain state and optimize the strategy of 3D printing complex parts from Inconel 718 alloy.

**Keywords:** heat-resistant alloy, 3D printing, selective laser sintering, heat treatment, hot isostatic pressing, X-ray diffraction, pole figures, modulus of elasticity, anisotropy.

**Вступ.** В останні роки все частіше досліджують та впроваджують нові перспективні матеріали та технології виробництва газотурбінних двигунів [1]. Один з таких матеріалів – жароміцний сплав Inconel 718, який активно використовують у нафтохімічній галузі, незамінний під час створення атомних реакторів, літальних апаратів, газових турбін, деталей ракетних і авіаційних двигунів (робочі лопатки), космічних апаратів [2]. Сьогодні для їх виготовлення застосовують 3D-друк –

Контактна особа: Д. В. ПАВЛЕНКО, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com

перспективну технологію адитивного виробництва з використанням методів селективного лазерного спікання або плавлення [3]. Однією із її особливостей для отримання складнопрофільних деталей є різний напрям формування окремих елементів.

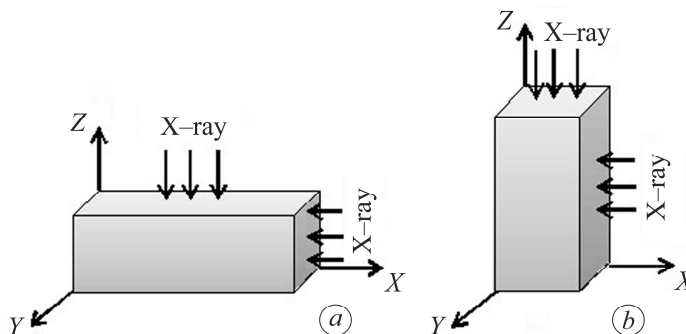
Щоб оцінити міцність [4] таких виробів, надзвичайно важливо розрахувати їх пружні параметри. У металевих матеріалах, одержаних в умовах адитивного виробництва, як правило, утворюється кристалографічна текстура [5, 6], що призводить до анізотропії пружних параметрів напівфабрикатів та виробів. Щоб визначити вплив характеристик оброблення на результуючу текстуру, необхідні відповідні методи для встановлення пружних параметрів. Оскільки модуль пружності матеріалу безпосередньо впливає на точність розрахунку напруженого стану деталей, то під час усереднення його значень для всіх елементів деталі можуть виникати суттєві похибки у розрахунку запасу їх міцності.

Мета дослідження – оцінити модуль пружності та зсуву, коефіцієнт Пуассона, а також їх анізотропію, визначені за пружними константами монокристала та характеристиками текстури за допомогою дифракції рентгенівських променів, зразків зі сплаву Inconel 718 (17...21 mass% Cr; 50...55 Ni; 2,8...3,3 Mo; 4,75...5,5 Nb; 0,65...1,15 Ti;  $\leq 1$  Co;  $\leq 0,05$  Ta;  $\leq 0,06$  V;  $\leq 0,35$  Mn;  $\leq 0,35$  Si;  $\leq 0,015$  P;  $\leq 0,015$  S;  $\leq 0,08$  C), виготовлених за технологією селективного лазерного спікання з порошків шляхом 3D-друку в горизонтальному та вертикальному напрямках побудови та термічно оброблених (post-treatment).

**Методики і матеріали дослідження.** Зі сплаву одержують високонавантажені деталі гарячої частини газотурбінних двигунів, що працюють при температурах до 700°C. Закономірності формування кристалографічної текстури встановлювали на призматичних зразках, вирощених на установці EOS M400. Вихідним матеріалом були сферичні гранули (порошки) [6].

Схема знімання  
рентгенівських спектрів  
від поверхонь зразків,  
побудованих  
у площині XY (a)  
та напрямку осі Z (b)

Scheme of removing  
X-ray spectrums from  
the surfaces of samples  
built the XY plane (a)  
and in the Z axis direction (b).



Досліджували зразки, надруковані у різних напрямках у вихідному стані (після друку) та після додаткового оброблення. У горизонтальному напрямку центральну вісь зразків розташовували паралельно до стола установки (у площині XY у напрямку осі X), у вертикальному – перпендикулярно (у площині YZ у напрямку осі Z). Текстуру зразків досліджували рентгенівським методом (див. рисунок). Їх заздалегідь хімічно полірували на глибину до 0,1 mm, щоб зняти дефектний поверхневий шар. Сканували дифрактометром ДРОН-3М у фільтрованому  $\text{MoK}_\alpha$ -випромінюванні. За результатами рентгенівського аналізу будували обернені полюсні фігури (ОПФ) для різних напрямків зразків.

**Результати та їх аналіз.** Режими отримання зразків та їх додаткового оброблення (post-treatment) наведені в табл. 1.

**Таблиця 1. Режими отримання та додаткової обробки досліджуваних зразків**

| № зразка | Технологія отримання порошків | Напрямок побудови зразка | Додаткове оброблення (post-treatment)             |
|----------|-------------------------------|--------------------------|---|
| 1        | PREP                          | Горизонтальний           | Без оброблення                                    |
| 2        | PREP                          | Вертикальний             | Без оброблення                                    |
| 3        | PREP                          | Горизонтальний           | Термічна обробка                                  |
| 4        | PREP                          | Вертикальний             | Термічна обробка                                  |
| 5        | PREP                          | Горизонтальний           | Гаряче ізостатичне пресування та термічна обробка |
| 6        | PREP                          | Вертикальний             | Гаряче ізостатичне пресування та термічна обробка |
| 7        | VIGA                          | Горизонтальний           | Термічна обробка                                  |
| 8        | VIGA                          | Вертикальний             | Термічна обробка                                  |
| 9        | VIGA                          | Горизонтальний           | Гаряче ізостатичне пресування та термічна обробка |
| 10       | VIGA                          | Вертикальний             | Гаряче ізостатичне пресування та термічна обробка |

Оскільки полюсна густина на ОПФ пропорційна об'ємній частці кристалів відповідної орієнтації, вважали, що модулі Юнга, зсуву та коефіцієнт Пуассона досліджуваних полікристалічних зразків у певному напрямку визначає сума питомих внесків параметрів монокристалів відповідної орієнтації, а питомий внесок – нормована полюсна густина  $P_{hkl}^N$  на ОПФ відповідного напрямку зразка, тобто відношення полюсної густини  $P_{hkl}$  до суми  $\sum_{hkl} P_{hkl}$  всіх значень  $P_{hkl}$  на відповідній ОПФ:

$$P_{hkl}^N = P_{hkl} / \sum_{hkl} P_{hkl} \cdot \quad (1)$$

Для розрахунку модулів Юнга, зсуву та коефіцієнта Пуассона їх подали через індекси Міллера  $hkl$  та пружні податливості  $S_{ij}$  та модулі  $C_{ij}$  монокристала сплаву [7–9].

З урахуванням рівняння (1) для пружних параметрів полікристала отримали:

$$1 / F_{\text{poly}} = P_{hkl}^N / F_{hkl}, \quad (2)$$

де  $F$  – відповідна характеристика ( $E$ ,  $G$  або  $\nu$ ). Числові значення пружних модулів  $C_{ij}$  з різних джерел наведені в табл. 2.

**Таблиця 2. Пружні модулі монокристала сплаву Inconel 718**

| № зразка         | $C_{11}$ | $C_{12}$ | $C_{44}$ | $C_0 = C_{11} - C_{12} - 2C_{44}$ | Джерело |
|------------------|----------|----------|----------|-----------------------------------|---------|
| 1                | 284      | 127      | 87       | -17                               | [10]    |
| 2                | 240,9    | 14,5     | 105,7    | -111                              | [11]    |
| 3                | 259,6    | 179      | 109,6    | -138,6                            | [12]    |
| 4                | 231,2    | 145,1    | 117,2    | -148,3                            | [13]    |
| 5                | 244,8    | 149,2    | 123,6    | -151,6                            | [7]     |
| Середнє значення | 252,1    | 148,2    | 108,6    | -113,3                            |         |

Оскільки значення  $C_{ij}$  дещо різняться, то у подальших розрахунках користувались усередненими результатами. Середні значення пружних податливостей  $S_{ij}$  монокристала сплаву Inconel 718, отримані за відомими співвідношеннями [14] та даними табл. 2, такі:  $S_{11} = 0,008092321$ ;  $S_{12} = -0,003143634$ ;  $S_{44} = 0,009009009$ ;  $S_0 = S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2}S_{44} = 0,006731451$ . За співвідношенням (1) визначали також нормовані значення полюсної густини  $P_{hkl}^N$  на ОПФ (табл. 3).

**Таблиця 3. Розрахункові значення пружних параметрів**

| № зразка | Модуль Юнга $E$ , GPa |        | Модуль зсуву $G$ , GPa |      | Коефіцієнт Пуассона $\nu$ |       |
|----------|-----------------------|--------|------------------------|------|---------------------------|-------|
|          | Напрямок розрахунку   |        |                        |      |                           |       |
|          | $X$                   | $Z$    | $X$                    | $Z$  | $X$                       | $Z$   |
| 1        | 201,87                | 204,47 | 70,5                   | 71,4 | 0,318                     | 0,316 |
| 2        | 207,20                | 189,56 | 70,3                   | 77,3 | 0,313                     | 0,334 |
| 3        | 205,83                | 196,92 | 70,5                   | 72,5 | 0,314                     | 0,322 |
| 4        | 201,20                | 197,32 | 71,1                   | 73,2 | 0,318                     | 0,322 |
| 5        | 353,31                | 351,32 | 69,6                   | 70,3 | 0,315                     | 0,319 |
| 6        | 357,99                | 353,11 | 70,4                   | 72,3 | 0,320                     | 0,319 |
| 7        | 203,34                | 195,20 | 70,8                   | 73,0 | 0,316                     | 0,324 |
| 8        | 197,68                | 203,05 | 70,7                   | 72,7 | 0,322                     | 0,316 |
| 9        | 354,49                | 348,77 | 69,5                   | 69,6 | 0,316                     | 0,316 |
| 10       | 359,60                | 354,38 | 69,4                   | 70,2 | 0,314                     | 0,319 |

Виявили суттєву анізотропію досліджуваних властивостей. Зокрема, для зразків, отриманих з порошків за технологією PREP без додаткового пост-друкарського оброблення (№ 1 та 2), пружні характеристики, розраховані в однакових напрямках (№ 1X, 2X, 1Z і 2Z) різняться: модулі Юнга – на  $\sim 2,6 \dots 8\%$ , модулі зсуву – на  $\sim 0,3 \dots 8\%$  та коефіцієнт Пуассона – на  $\sim 2 \dots 6\%$ , а зразків № 1, обчислені у напрямку  $X$ , та № 2, знайдені у напрямку  $Z$  (тобто № 1X та 2Z), різняться на  $\sim 6$ ;  $\sim 10$  та  $\sim 5\%$ , відповідно. При цьому модулі пружності горизонтальних зразків у напрямку  $X$  переважають такі вертикальних у напрямку  $Z$ . Аналогічні закономірності спостерігали раніше [9]. Для модуля зсуву та коефіцієнта Пуассона тенденція протилежна.

Після термічної обробки (зразки № 3 і 4) пружні параметри, розраховані в однакових напрямках (№ 3X, 4X, 3Z і 4Z), різняться: модулі Юнга – на  $\sim 0,2 \dots 2,3\%$ , модулі зсуву – на  $\sim 0,9 \dots 7\%$  та коефіцієнт Пуассона – на  $\sim 1\%$ , зокрема, зразка № 3, розраховані у напрямку  $X$ , та зразка № 4 – у напрямку  $Z$  (тобто № 3X та 4Z) – на  $\sim 4$ ;  $\sim 4$  та  $\sim 2,5\%$ , відповідно.

Термічна обробка проти друку сприяє зменшенню анізотропії сплаву. За комплексного застосування гарячого ізостатичного пресування (ГІП) та термічної обробки (зразки № 5 і 6) різниця між досліджуваними параметрами складає не більш ніж  $1,5\%$ . Близькими значеннями володіють зразки з порошків, отриманих за технологією VIGA (зразки № 7–10). Встановлені закономірності узгоджуються з наведеними у працях [15, 16].

Експериментальні значення модуля пружності зразків, отриманих 3D-друком у горизонтальному та вертикальному напрямках, усереднені за декількома

вимірами [16] і становлять, відповідно, 202,2 та 179 GPa. Порівнюючи значення, розраховані у напрямку  $X$  горизонтального зразка та у напрямку  $Z$  вертикального (зразки № 1 і 2), з відповідними експериментальними, виявили, що відхилення від експериментальних не перевищує 6%. Термічна обробка після 3D-друку сприяє збільшенню модулів пружності, а за її комбінації з ГПІ – ще суттєвіше.

Усереднені експериментальні значення модуля пружності зразків, отриманих у подібних умовах [17], становлять 304 і 310 GPa для горизонтального та вертикального напрямків, відповідно. Зіставлення розрахованих у напрямках  $X$  та  $Z$  значень (зразки № 5; 6 і 9; 10) з відповідними експериментальними [17] свідчить, що відхилення не перевищує 17% і, можливо, пов'язане з іншим режимом додаткового оброблення після друку. Модуль зсуву дроту зі сплаву становить 77,2 GPa [18]. Максимальне відхилення розрахункових значень (табл. 3) від наведеного складає 10%. Визначені значення коефіцієнта Пуассона знаходяться в інтервалі 0,25...0,35, що узгоджується з одержаними раніше результатами [19].

### ВИСНОВКИ

За результатами аналізу обернених полюсних фігур зразків зі сплаву Inconel 718, отриманих за технологією селективного лазерного спікання з порошків 3D-друком та після пост-друкарського оброблення у різних комбінаціях, теоретично оцінено модулі пружності та зсуву, коефіцієнт Пуассона та їх анізотропію в горизонтальному та вертикальному напрямках побудови. Для цього використано пружні константи монокристала та характеристики текстури, визначені за допомогою дифракції рентгенівських променів. Встановлено анізотропію досліджуваних властивостей. Модулі пружності горизонтальних зразків, визначених у напрямку  $X$ , вищі, ніж вертикальних у напрямку  $Z$ , на 8...10%. Тенденція зміни модуля зсуву та коефіцієнта Пуассона протилежна. Відхилення розрахункових значень модуля пружності у напрямку  $X$  горизонтального зразка та у напрямку  $Z$  вертикального від експериментальних не перевищує 6%. Термічна обробка зразків після 3D-друку, а також з гарячим ізостатичним пресуванням сприяє їх підвищенню та зменшенню анізотропії. Розрахункові значення коефіцієнта Пуассона сплаву після 3D-друку та додаткового оброблення знаходяться в інтервалі 0,31...0,33. Встановлено, що технологія виготовлення порошків для 3D-друку суттєво не змінює анізотропію пружних параметрів зразків.

1. Pavlenko D., Dvirnyk Y., and Przysowa R. Advanced materials and technologies for compressor blades of small turbofan engines // *Aerospace*. – 2021. – **8**, № 1. – P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/aerospace8010001>
2. Additive manufacturing technologies: an overview about 3D printing methods and future prospects / M. Jiménez, L. Romero, I. A. Domoinguez, M. Espinosa, and M. Domínguez // *Hindawi Complexity*. – 2019 – Article ID 9656938. <https://www.hindawi.com/journals/complexity/2019/9656938/>
3. Zhang B., Li Y., and Bai Q. Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review // *Chinese J. of Mech. Eng.* – 2017. – **30**, № 3. – P. 515–527. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0121-5>
4. Relation of elastic properties, yield stress and ultimate strength of polycrystalline metals to their melting and evaporation parameters with account for nano and micro structure / A. M. Polyanskiy, V. A. Polyanskiy, A. K. Belyaev, and Yu. A. Yakovlev // *Acta Mechanica*. – 2018. – **229**. – P. 4863–4873. <https://doi.org/10.1007/s00707-018-2262-8>
5. Structure, texture and phases in 3D printed IN718 alloy subjected to homogenization and HIP treatments / A. Mostafa, I. Picazo Rubio, V. Brailovski, M. Jahazi, and M. Medraj // *Metals*. – 2017. – **7**, №. 6. – P. 196. <https://doi.org/10.3390/met7060196>
6. Texture and anisotropy of mechanical properties of Inconel 718 alloy products obtained by 3D-printing from powders / V. V. Usov, N. M. Shkatuliak, N. I. Rybak, M. O. Tsarenko, D. V. Pavlenko, D. V. Tkach, and O. O. Pedash // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2023. – **45**, № 1. – P. 111–125. DOI:10.15407/mfint.45.01.0111

7. *Determination of the high temperature elastic properties and diffraction elastic constants of Ni-base superalloys* / P. Aba-Perea, T. Pirling, P. Withers, J. Kelleher, S. Kabra, and M. Preuss // *Materials & Design*. – 2016. – **89**, № 5. – P. 856–863.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.152>
8. *Evaluation of single crystal elastic stiffness coefficients of a nickel-based superalloy by electron backscatter diffraction and nanoindentation* / J. Everaerts, C. Papadaki, W. Li, and A. M. Korsunsky // *J. of the Mech. and Physics of Solids*. – 2019. – **131**. – P. 303–312.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2019.07.011>
9. *Anisotropic elasticity of silicon and its application to the modelling of X-ray optics* / L. Zhang, R. Barrett, P. Cloetens, C. Detlefs, and M. Sanchez del Rio // *J. of Synchrotron Radiation*. – 2014. – **21**, № 3. – P. 507–517. <https://doi.org/10.1107/S1600577514004962>
10. *Obermayer T., Kremaszky C., and Werner E. Analysis of texture and anisotropic elastic properties of additively manufactured Ni-base alloys* // *Metals*. – 2022. – **12**, № 11. – P. 1991–2002. <https://doi.org/10.3390/met12111991>
11. *Haldipur P., Margetan F. J., and Thompson R. B. Estimation of single-crystal elastic constants from ultrasonic measurements on polycrystalline specimens* // *AIP Conf. Proc.* – 2004. – **700**, Is. 1. – P. 1061–1068. <https://doi.org/10.1063/1.1711735>
12. *A multiscale model for the elastoviscoplastic behavior of directionally solidified alloys: application to FE structural computations* / G. Martin, N. Ochoa, K. Sai, E. Hervé-Luanco, and G. Cailletaud // *Int. J. of Solids and Struct.* – 2014. – **51**, № 5. – P. 1175–1187.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.12.013>
13. *An investigation of micro-mechanisms in hydrogen induced cracking in nickel-based superalloy 718* / S. Jothi, S. V. Merzlikin, T. N. Croft, J. Andersson, and S. G. R. Brown // *J. of Alloys and Compounds*. – 2016. – **664**. – P. 664–681.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.01.033>
14. *Nye J. F. Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices*. – Oxford: Clarendon Press, 1985. – 322 p. <https://vdoc.pub/download/physical-properties-of-crystals-their-representation-by-tensors-and-matrices-3ib3oss7ne9g>
15. *Determination of anisotropic mechanical properties for materials processed by laser powder bed fusion* / E. W. Hovig, A. S. Azar, F. Grytten, K. Sorby, and E. Andreassen // *Hindawi Advances in Mater. Sci. and Eng.* – 2018. – Article ID 7650303. – 20 p.  
<https://doi.org/10.1155/2018/7650303>
16. *Daña M., Zetková I., and Mach J. Mechanical properties of Inconel alloy 718 produced by 3D printing using DMLS* // *Manufacturing Technology*. – 2018. – **18**, № 4. – P. 559–562. DOI: 10.21062/ujep/137.2018/a/1213-2489/MT/18/4/559
17. *Vodennikova O. S., Koval M. O., and Vodennikov S. A. Investigation of mechanical properties and structure of Inconel 718 alloy obtained by selective laser sintering from powder produced by 'LPW'* // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2021. – **43**, № 7. – P. 925–937. <https://mfint.imp.kiev.ua/article/v43/i07/MFiNT.43.0925.pdf>
18. *Alloy wire International. Inconel\*718*. <https://www.alloywire.ru/products/inconel-718/>
19. *Productivity Improvement through Suitable Selection of Conventional Abrasive Wheel in Grinding of Inconel 718 Superalloy* / Manoj Kumar Sinha, Rajeshkumar Madarkar, Sudarsan Ghosh, and Venkateswara Rao Paruchuri // *3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Industrial Eng.* – 2015. – P. 1–6.  
[https://www.researchgate.net/profile/Manoj-Sinha-2/publication/286035547\\_Productivity\\_Improvement\\_through\\_Suitable\\_Selection\\_of\\_Conventional\\_Abrasive\\_Wheel\\_in\\_Grinding\\_of\\_Inconel\\_718\\_Superalloy/links/5665863d08ae418a786f03de/Productivity-Improvement-through-Suitable-Selection-of-Conventional-Abrasive-Wheel-in-Grinding-of-Inconel-718-Superalloy.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Manoj-Sinha-2/publication/286035547_Productivity_Improvement_through_Suitable_Selection_of_Conventional_Abrasive_Wheel_in_Grinding_of_Inconel_718_Superalloy/links/5665863d08ae418a786f03de/Productivity-Improvement-through-Suitable-Selection-of-Conventional-Abrasive-Wheel-in-Grinding-of-Inconel-718-Superalloy.pdf)

Одержано 26.04.2023