

ВПЛИВ ЧАСОВОГО ІНТЕРВАЛУ МІЖ НАНЕСЕННЯМ ШАРІВ ЗА SLM-ТЕХНОЛОГІЄЮ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ INCONEL 718

С. В. АДЖАМСЬКИЙ^{1,2}, З. В. САЗАНІШВІЛІ¹,
Ю. В. ТКАЧОВ¹, Г. А. КОНОНЕНКО^{2,3}

¹ Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара;

² LLC "Additive Laser Technology of Ukraine";

³ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро

Досліджено вплив одноразової зупинки під час виготовлення деталей за SLM-технологією на структуру і механічні властивості зразків зі сплаву Inconel 718, щоб встановити їх придатність до експлуатації. Зразки виготовлено на обладнанні різних виробників з зупинкою під час друку і без. Механічні властивості визначено під час випробувань на розтяг згідно з вимогами ГОСТ 1497 (ISO 6892-84) і встановлено, що за безперервного технологічного процесу і зі зупинкою під час виготовлення зразків вони поліпшуються.

Ключові слова: SLM-технологія, механічні властивості, мікроструктура, сплав Inconel 718, технологічний процес.

The effect of a single stop in the process of production of parts by SLM-technology on the structure and mechanical properties of Inconel 718 alloy samples is investigated to determine the suitability of parts with such a feature for operation. Samples are made on the equipment of different manufacturers with a stop during printing and without it. Mechanical properties are determined under tensile tests in accordance with the requirements of standard ГОСТ 1497 (ISO 6892-84). It is established that the mechanical properties of samples by a continuous process and a stop during manufacture are improved.

Keywords: SLM-technology, mechanical properties, microstructure, Inconel 718 alloy, technological process.

Вступ. У сучасному виробництві для виготовлення деталей з металевого порошку широко застосовують метод селективного лазерного плавлення – Selective Laser Melting (SLM), заснований на пошаровому сплавленні частинок порошку, коли лазерний промінь переміщується згідно зі заданою траєкторією (рис. 1).

Під час плавлення на такому обладнанні створюють деталі складної геометрії шар за шаром, використовуючи цифрові 3D-моделі. Товщина шару знаходиться в межах від 15 до 150 μm залежно від застосовуваного матеріалу. Для плавлення металу вживають іттербієві (ytterbium) волоконні лазери потужністю від 200 до 1000 V, промені яких за допомогою дзеркал на швидкодійному приводі фокусуються в потрібне місце формування контуру деталі [1, 2]. Камеру заповнюють інертним газом (азотом або аргоном), щоб уникнути небажаного окиснення деталі. Кожен наступний шар отримують, опускаючи платформу з деталлю на глибину, рівну висоті шару. Після цього з бункера, що подає порошок, приводним лезом наносять новий шар. Весь цикл повторюють до моменту повного формування деталі по висоті. Продуктивність установки може становити від 10 до 50 cm^3/h залежно від геометрії виробу, товщини робочого шару і стратегії побудови.

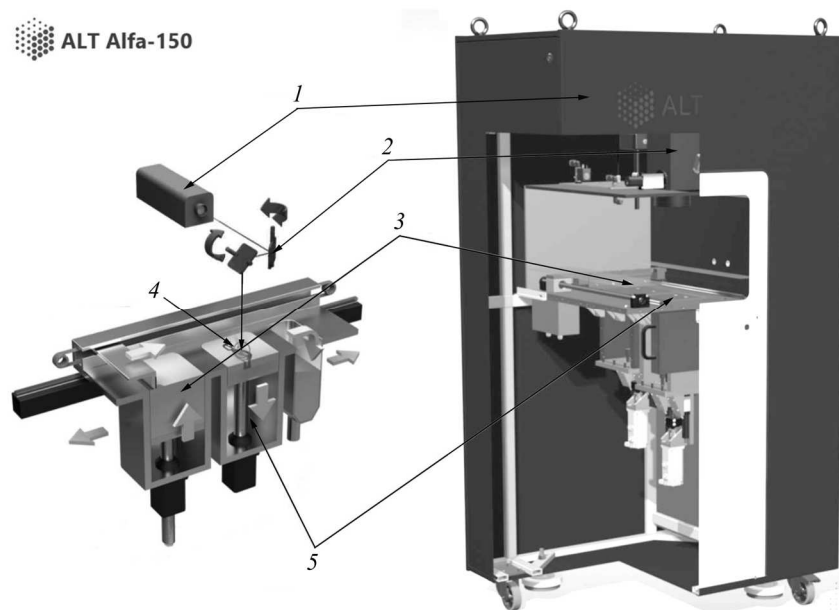


Рис. 1. Принципова схема роботи 3D-принтера: 1 – лазер; 2 – система сканування; 3 – подавання порошку; 4 – об’єкт друку; 5 – платформа з об’єктом.

Fig. 1. A chart of 3D-printer operation: 1 – laser; 2 – scanning system; 3 – powder supply; 4 – a printing object; 5 – a platform with an object.

Під час SLM-процесу металеві порошки в шарі швидко розплавляються під променем лазера, а потім миттєво тверднуть у ванні розплаву (швидкість охолодження від 10^3 до 10^8 K/s [3]) з короткочасним переходом з рідкого в твердий стан і формуванням високодисперсної мікроструктури. Цим способом можна виготовляти деталі складної форми без спеціального технологічного оснащення, зменшити їх номенклатуру та кількість складальних операцій, забезпечити задану точність розмірів і форм відповідно до конструкторської документації, звести до мінімуму подальше механічне оброблення і наблизити коефіцієнт використання матеріалу до 100%.

Основні виробники обладнання для виготовлення деталей за SLM-технологією знаходяться в Європі і Америці, наприклад, компанії 3D Systems (США), Electro Optical Systems (EOS, Німеччина), Concept Laser GmbH (Німеччина). Пропоновані на ринку рішення дороги і вимагають додаткового програмного забезпечення під різні матеріали, крім того порошок необхідно купувати у виробника обладнання.

В Україні над розробленням такого обладнання працює компанія LLC “Additive Laser Technology of Ukraine”. Тут найважливіше створити методику вибору параметрів процесу плавлення порошку, які забезпечать потрібні технологічні, механічні та експлуатаційні властивості деталей.

У цій статті обговорено один з аспектів цієї задачі, пов’язаний зі змінами властивостей матеріалу, які виникають в результаті зупинки устаткування з непередбачуваної причини, або під час регульованої паузи під час друку до повного завершення формоутворення деталі.

Формулювання задачі. В адитивному виробництві використовують обладнання, що характеризується високою гнучкістю і переналаштовуваністю, тому ідеальне для умов експериментального одиничного виробництва.

Під час виробництва ракет-носіїв особливе місце займають процеси виготовлення камер згоряння двигунів, а використовувані технології є трудомісткими і

комплексними, в першу чергу, через складність конструкції. Тут перспективна SLM-технологія, яка дає можливість виготовляти деталі зі складною геометрією, з внутрішніми порожнинами і каналами охолодження, не використовуючи дороге спеціальне оснащення, операції вальцювання, штампування, гнуття, а також складальні операції паяння і зварювання. Вузли ракетних двигунів найчастіше виготовляють з жароміцних нікелевих сплавів. Зокрема, термонавантажені конструкції – з нікелевого сплаву Inconel 718.

Тому вивчали вплив потужності лазера і відстані між лініями сканування на пористість і дисперсність мікроструктури деталей з порошку цього сплаву [4]. Однак під час їх виготовлення іноді можливі зупинки з різних причин. Існує думка, що це може призводити до погіршення механічних властивостей і суттєвої зміни мікроструктури, а отже, несприятливо впливати на експлуатаційну надійність деталей. Відомо, що за малих інтервалів під час створення шарів наступні успадковують текстуру попереднього шару, і формуються витягнуті по осі Z зерна, розміри яких відповідають товщині десятків шарів, і таке велике зерно зумовлює погіршення механічних властивостей металу. Водночас існує думка, що для пошарового виготовлення деталей регульований інтервал між створенням шарів сприятливо діє на структуру і властивості, спричиняючи формуванню дрібнозернистої структури.

Тому досліджували вплив одноразової зупинки під час побудови деталей зі сплаву Inconel 718 за SLM-технологією на структуру і механічні властивості зразків, щоб встановити їх придатність до експлуатації.

Матеріали і методи випробувань. Досліджували зразки, виготовлені на установці ALT Alfa-150 виробництва LLC “Additive Laser Technology of Ukraine” з порошку жароміцного сплаву Inconel 718 (табл. 1) за такими режимами: відстань між треками 0,10 mm (перекриття треків ~30%); потужність лазера 175 W; швидкість його руху 800 mm/s; товщина шару 0,050 mm; діаметр променя 0,050 mm.

Першу партію друкували згідно зі заданими параметрами без зупинок, а другу – з зупинкою під час друку на висоті, що відповідала робочій частині зразка на розтяг. Для порівняння випробовували зразки, виготовлені в Німеччині компанією “Böhler”.

Таблиця 1. Хімічний склад сплаву Inconel 718 (mass%)

Ni	53,5	Mo	3,00	Si	0,07	S	< 0,0003
Cr	17,82	Ti	0,94	Mn	0,08	Pb	< 0,0003
Fe	18,03	B	0,0026	Cu	0,06	Ta	< 0,020
Nb	5,50	C	0,026	N	0,005	Bi	< 0,00003
Al	0,55	Co	0,32	P	0,011	Se	< 0,0003

Механічні властивості визначали під час розтягу на установці TTDM-5004 “Instron” за нормальних умов. Розмір, форма зразків і методика випробувань відповідали ГОСТ 1497 (ISO 6892-84) (рис. 2). Мікроструктуру вивчали на оптичному мікроскопі AXIOVERT 200M MAT (Carl Zeiss), поля на “голівках” зразків – у паралельних X-Y і перпендикулярних X-Z до напрямку виготовлення виробу площинах, а також у місці зупинки друку.

Результати та їх обговорення. Важливо під час відпрацювання SLM-технології забезпечити необхідні механічні властивості. За впливу висококонцентрованих джерел енергії та підвищених температур на спеціальні сплави і леговані сталі формується особливий комплекс механічних властивостей [5, 6] (табл. 2).

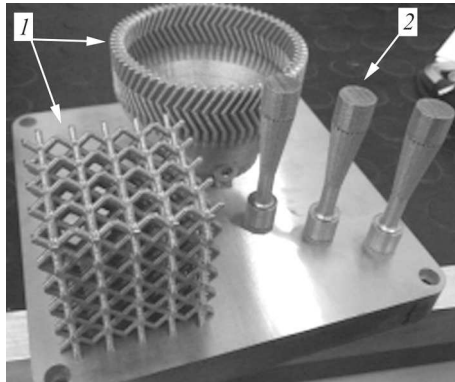


Рис. 2. Загальний вигляд зразків на розтяг, виготовлених методом селективного лазерного плавлення: 1 – готові деталі; 2 – зразки для випробувань.

Fig. 2. A general view of the tensile testing samples after manufacturing by selective laser melting: 1 – completed parts; 2 – test specimens.

Таблиця 2. Механічні властивості сплаву Inconel 718 після різних способів виробництва

Спосіб виготовлення	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5 , %
	МПа		
Після 3-D побудови [8]	980 ± 50	700 ± 50	28 ± 3
У литому стані [7]	790	400	90

Виявили (табл. 3), що відхилення механічних властивостей зразків, виготовлених зі зупинкою технологічного процесу і без, становить не більш ніж 5%, і відповідає характеристикам зразків, виготовлених у Німеччині [8]. Слід зазначити, що зразки під час зупинки друку руйнувались у місці зупинки (рис. 3).

Таблиця 3. Механічні властивості дослідних зразків зі сплаву Inconel 718

Партія зразків	№ зразка	F , mm ²	P_{max} , N	σ_B , МПа	$P_{0,2}$, N	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
LLC “ALT Ukraine”, без зупинки	1	19,23	2000	1019,073	1410	718,91	40,0
	2	18,85	2050	1066,67	1400	728,45	39,8
	3	19,23	2005	1022,28	1405	716,36	42,3
LLC “ALT Ukraine”, зі зупинкою	1	20,41	2125	1021,01	1493	717,38	41,4
	2	20,41	2094	1006,20	1487	714,44	40,0
“Böhler” (Німеччина), без зупинки	1	19,63	2070	1034,42	1431	715,10	35,6
	2	20,02	2090	1023,84	1451	710,81	35,6

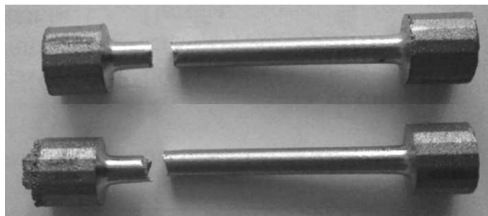


Рис. 3. Зразки на розтяг після руйнування.

Fig. 3. Tensile testing samples after fracture.

Механічні властивості виробів під час розтягу безпосередньо залежать від внутрішньої будови матеріалу. Для дослідження зміни його структури під час зупинки друку виконували металографічний аналіз. Особливу увагу приділяли дефектам, зокрема порам, які можуть служити концентраторами руйнування сплаву, а також розміру зерна, так як з його подрібненням зростають міцність і пластичність за співвідношенням Холла–Петча [9] (рис. 4).

Обрані параметри виготовлення виробів дали можливість забезпечити мінімальну пористість зразків (рис. 4a, d), що позитивно вплинуло на їх міцність. По-

ри мають правильну округлу форму, тобто викликані незначною кількістю газу, що потрапляє в розплавлену ванну з частинками порошку. Чітко видно зеренну структуру зразка (рис. 4*b–e*).

За методом SLM зерна витягуються в напрямку виготовлення виробів, що може викликати анізотропію їх властивостей. Середній розмір зерна по осі X становить 59,0 мкм, а по осі Z – 87,2 мкм. За даними праці [7], сплав Inconel718 у литому стані має дендритну структуру зі середнім розміром зерен 500 мкм. З подрібненням зерна зростають тимчасовий опір і границя плинності під час розтягу. Зразки, виготовлені в Німеччині (рис. 5), пористіші, розмір зерна відповідає розміру зерна зразків, отриманих на обладнанні LLC “Additive Laser Technology of Ukraine”. Цим пояснюють деяке зниження відносного видовження під час випробувань.

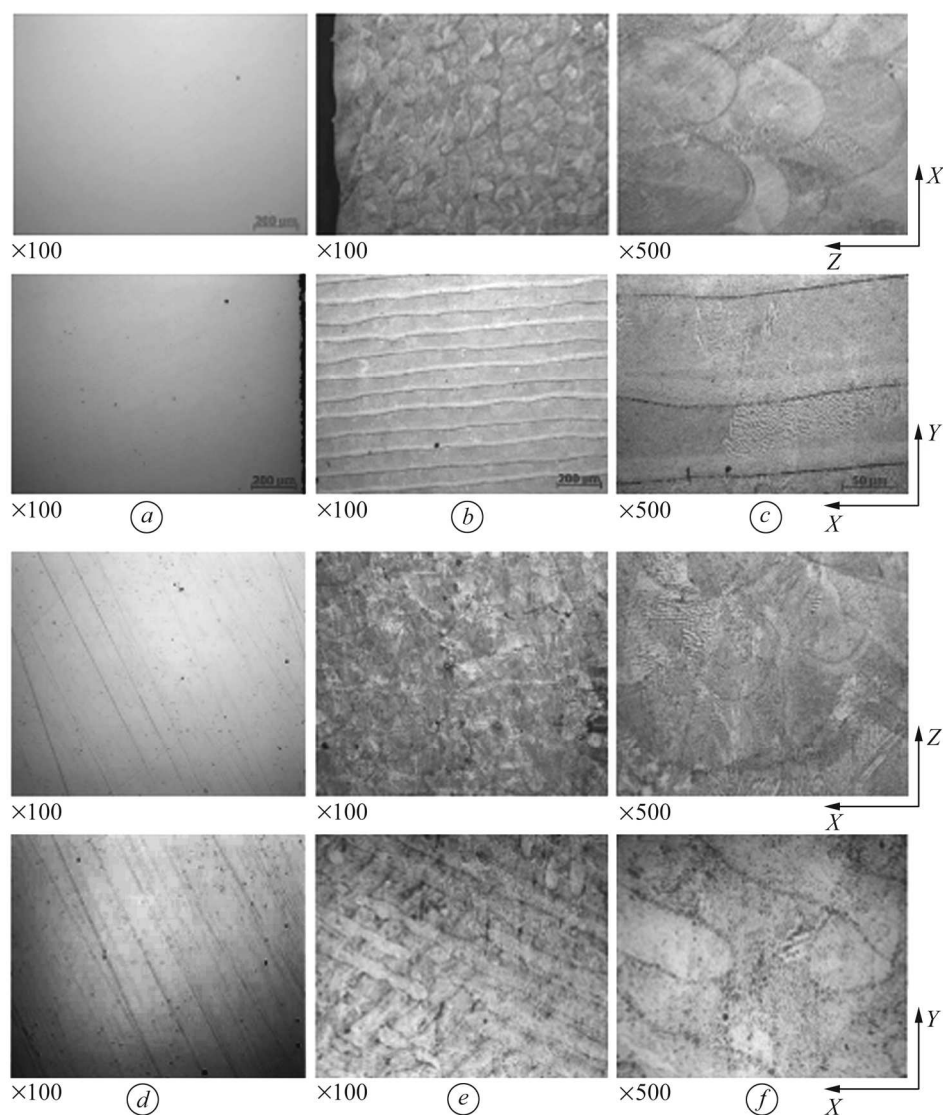


Рис. 4. Мікроструктура зразків: *a–c* – отриманих без зупинки; *d–e* – зі зупинкою під час виготовлення; $\times 100$ і 500.

Fig. 4. Microstructure of the samples: *a–c* – obtained without a stop; *d–e* – with a stop during manufacturing; $\times 100$ and 500.

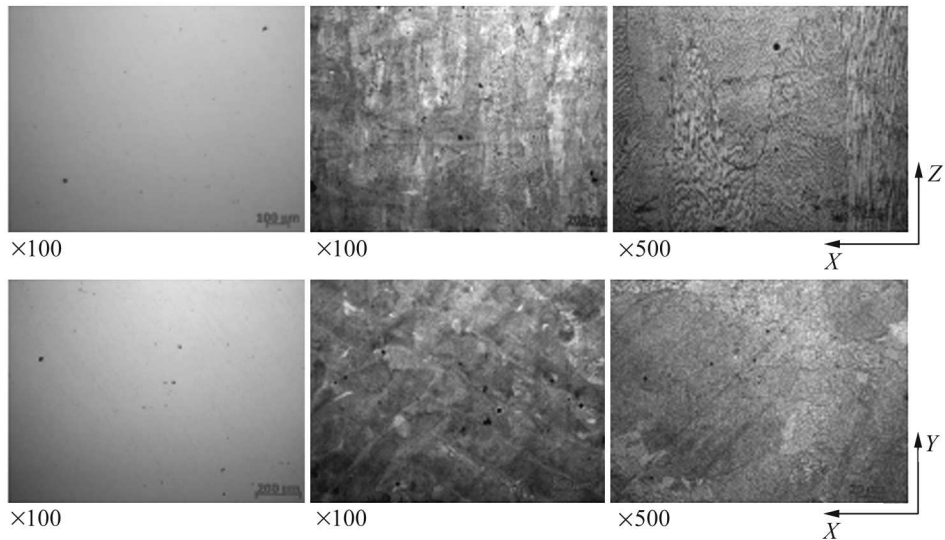


Рис. 5. Порівняння зразків, виготовлених у Німеччині.

Fig. 5. Comparison of samples made in Germany.

Щоб глибше зрозуміти вплив непередбачуваних зупинок устаткування на структуру сплаву, проаналізували переріз зразків у напрямку осі $X-Z$ у місці зупинки друку (рис. 6).

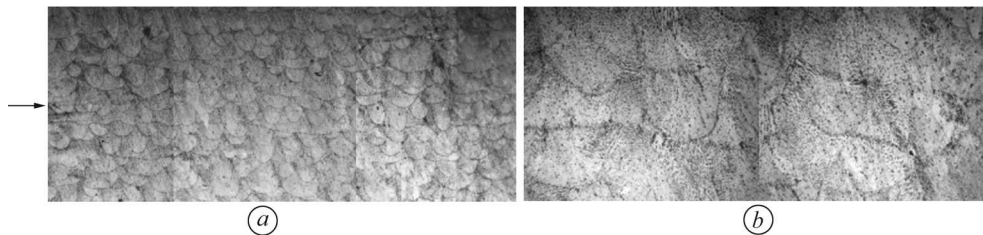


Рис. 6. Мікроструктура зразка в зоні зупинки друку (вказано стрілкою): $a - \times 100$; $b - \times 500$.

Fig. 6. Microstructure of the sample in the zone of printing stop (indicated by an arrow):
 $a - \times 100$; $b - \times 500$.

Зупинка друку не впливає на мікроструктуру зразка і розмір зерна. Структура містить також зерна, витягнуті вздовж осі Z . Під час зупинки друку останній шар встигає затверднути і охолонути. Тому після продовження друку умови розплавлення металу нового шару різняться від умов процесу без зупинки: внаслідок меншої кількості тепла, що передається від попереднього шару. Обсяг розплавленої лазером ванни нового шару після зупинки дещо менший. В результаті цього після зупинки нижні шари проплаву мають меншу товщину, через що руйнування відбувається за цим перерізом, але за допустимих значень навантаження.

ВИСНОВКИ

Порівняно механічні властивості зразків зі сплаву Inconel 718, виготовлених за безперервним технологічним процесом і зі зупинкою. Тимчасовий опір і границя плинності, а також відносне видовження високі і різняться за різних умов виготовлення зразків менше, ніж на 5%, що відповідає закордонним аналогам. Зразки, виготовлені Ltd “Additive Laser Technology of Ukraine” менш пористі, ніж німецької компанії “Böhler”. Розмір зерен зразків, вироблених методом селективного лазерного плавлення, на порядок менший, ніж зразків, виготовлених ливар-

ним способом. Цим можна обґрунтувати поліпшення механічних властивостей матеріалу під час розтягу. За непередбачуваної зупинки обладнання зменшується розмір зони проплавлення матеріалу, що призводить до руйнування саме в цьому місці. Але цей дефект не критичний і виробі придатні для подальшого контролю.

1. Williams C. B., Mistree F., and Rosen D. W. Towards the design of a layerbased additive manufacturing process for the realization of metal parts of designed mesostructured // Proc. 16th Solid Free. Fabr. Symp. – 2005. – P. 217–230.
2. Concept Laser GmbH [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.concept-laser.de/technologie.html>. – Загл. с экрана. – Яз. нем., англ.
3. Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061 / L.-E. Loh, C.-K. Chua, W.-Y. Yeong, J. Song, M. Marpar, S.-L. Sing, Z.-H. Liu, D.-Q. Zhang // Int. J. Heat Mass Transf. – 2015. – **80**. – P. 288–300.
4. Аджамский С. В., Кононенко А. А. Закономерности влияния параметров процесса SLM на формирование единичного слоя из жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 // Автоматичне зварювання. – 2020. – № 1. – С. 1–7.
5. Структура та механічні властивості лазерних зварних з'єднань сталевих пластин з цинковими покриттями / J. Vinas, J. Brezinova, J. Brezina, P. O. Maruschak // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – **55**, № 1. – С. 47–51.
(Structural and mechanical features of laser-welded joints of zinc-coated advanced steel sheets / J. Viňáš, J. Brezinová, J. Brezina, and P. O. Maruschak // Materials Science. – 2019. – **55**, № 1. – P. 46–51.)
6. Дудда В. Вплив підвищених температур на механічні характеристики сталей 26H2MF та St12T // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – **55**, № 3. – С. 125–129.
(Dudda W. Influence of high temperatures on the mechanical characteristics of 26H2MF and ST12T steels // Materials Science. – 2019. – **55**, № 3. – P. 435–439.)
7. Грязнов М. Ю. Физико-механические свойства и структура сплава Inconel 718, полученного по технологии послойного лазерного сплавления / М. Ю. Грязнов, С. В. Шотин, В. Н. Чувильдеев // Физика твердого тела. – 2014. – **1**, № 4. – С. 46–51.
8. ASM Metals HandBook V. 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials // ASM Int. – 2002. – 3470 p.
9. Callister W. D. and Callister Jr. Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Interactive: Text, 5th Ed. – Wiley, 2000. – 552 p.

Одержано 05.03.2020