

ВПЛИВ ЗУПИНКИ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗРАЗКІВ ЗІ СПЛАВУ Co–Cr–Mo, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА SLM-ТЕХНОЛОГІЄЮ

С.А. Аджамський^{1,2}, Г.А. Кононенко^{1,3}, Р.В. Подольський^{1,3,4}

¹ТОВ «Адитивні лазерні технології України». 49000, м. Дніпро, вул. Сергія Подолинського, 31в.
E-mail: info@alt-print.com

²Інститут транспортних систем і технологій НАН України. 49000, м. Дніпро, вул. Писаржевського, 5.
E-mail: itst@westa-inter.com

³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. 49000, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1.
E-mail: office.isi@nas.gov.ua

⁴Український державний університет науки і технологій. 49000, м. Дніпро, просп. Гагарина, 4,
E-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

У сучасному виробництві деталей з металевих порошків широкого поширення набув метод селективного лазерного плавлення – Selective Laser Melting (SLM). В Україні розробкою обладнання для виробництва деталей із металевих порошків за SLM-технологією займається компанія ТОВ «Адитивні лазерні технології України». У даний час для даного обладнання актуальним завданням є розробка методики вибору параметрів процесу плавлення металевих порошків, що забезпечують необхідні механічні та експлуатаційні властивості деталей. Для досліджень були виготовлені у вертикальному напрямі три дослідні циліндричні зразки зі сплаву Co–Cr–Mo для випробування на розтяг за ISO 6892:2019 – з діаметром робочої зони 5 мм, з контрольованою зупинкою на висоті 18 мм від початку робочої зони, загальна довжина якої складає 28 мм. В результаті аналізу значень механічних властивостей встановлено, що тимчасовий опір дослідних зразків з контрольованою зупинкою протягом 24 год. сплаву Co–Cr–Mo, виготовленого за SLM-технологією, зменшується в порівнянні зі зразками, виготовленими без контрольованої зупинки – на ~13 %, відносно подовження – на ~1 % та відносно звуження – на ~17 %. Встановлено, що для дослідних зразків з зупинкою в процесі виготовлення відхилення від середніх значень складало: для тимчасового опору ~11 %, відносного подовження ~62 % та відносного звуження ~21 %. Це обумовлено руйнуванням одного зі зразків в місці зупинки. Використання деталей з дефектом виробництва (зупинка) має бути суттєво обмежено, відповідно до можливого значного зменшення та окрихнення виробу. Бібліогр. 17, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: селективне лазерне плавлення, контрольована зупинка, сплав Co–Cr–Mo, механічні властивості, щільність

Вступ. У сучасному виробництві деталей з металевих порошків широкого поширення набув метод селективного лазерного плавлення – Selective Laser Melting (SLM). Дана технологія заснована на пошаровому сплавленні частинок металевих порошків, при якому процес плавлення здійснюється переміщенням лазерного променя відповідно до цифрової тривимірної моделі об'єкта, що створюється.

В даний час основні виробники обладнання для виготовлення деталей за SLM-технологією знаходяться в Європі та Америці, наприклад, компанії 3D Systems (США), Electro Optical Systems – EOS (Німеччина), Concept Laser GmbH (Німеччина) та в інших країнах світу. Пропоновані на ринку рішення є дорогими та потребують додаткового придбання програмного забезпечення під різні матеріали, а також закупівлі порошків у виробника обладнання.

В Україні розробкою обладнання для створення деталей із металевих порошків за SLM-тех-

нологією займається компанія ТОВ «Адитивні лазерні технології України» («АЛТ Україна»). Перевагою обладнання вітчизняного виробника є можливість самостійно коригувати параметри виготовлення для різних матеріалів та для врахування геометричних особливостей виробу (значна зміна перерізу, похилі поверхні тощо).

Дослідженню технологічних аспектів виготовлення деталей шляхом пошарового нанесення порошкового шару з наступним плавленням присвячено велику кількість публікацій [1–4]. Дані дослідження спрямовані на отримання високої щільності [5–8], визначенні раціональних параметрів [9–12] та застосування їх при виробництві деталей [13–15]. Виходячи з аналізу вказаних робіт встановлено, що в більшості випадків велика кількість факторів відіграють значну роль в процесі виготовлення деталей для реальних умов друку. Але слід зазначити, що при цьому є ряд причин, через які можуть відбуватися зупинки

Аджамський С.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6095-8646>, Кононенко Г.А. – <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>,
Подольський Р.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>

© С.А. Аджамський, Г.А. Кононенко, Р.В. Подольський, 2023

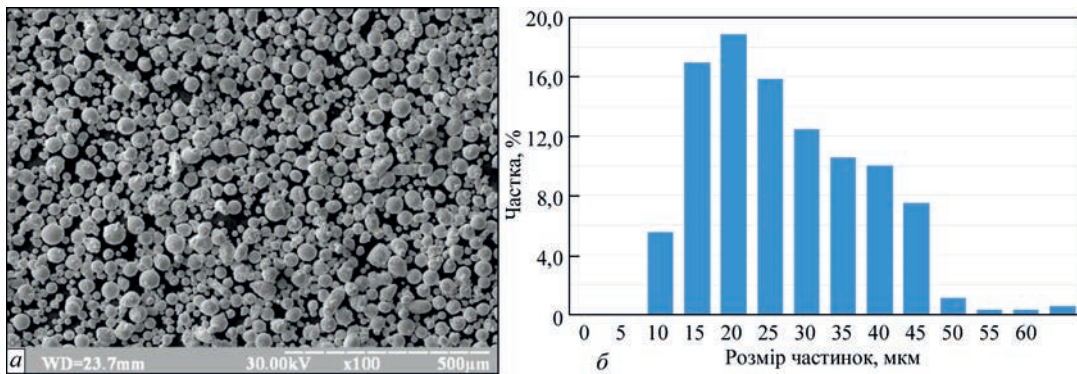


Рис. 1. Частинки вихідного матеріалу Co–Cr–Mo при збільшенні 100 (а) та результати гранулометричного аналізу (б)

процесу: зменшення швидкості нанесення нового шару, нерівномірність нанесення порошку, підбив деталі через викривлення та ін. Це може відігравати значну роль у зміні кінцевих механічних властивостей через різні швидкості охолодження та вплив ламінарних потоків інертного газу на надрукований шар.

Виходячи з попередніх досліджень жароміцного сплаву Inconel 718 [16] (що застосовується для деталей та вузлів авіа- та космічного призначення) було достатньо чітко вказано, що зупинка друку з послідуємим відновленням процесу не має значного впливу на механічні властивості (відхилення приблизно 5 %), середній рівень яких відповідав зарубіжним аналогам. При мікроструктурних дослідженнях авторами було встановлено ділянку зі зниженим проплавленням матеріалу, що знаходилась в зоні зупинки.

Проблема впливу зупинки в процесі виготовлення деталей способом SLM потребує подальшого дослідження, в тому числі при застосуванні інших матеріалів, з метою визначення рівня відхилень механічних властивостей та прогнозування можливості експлуатації таких виробів. Сплав Co–Cr–Mo широко застосовується в стоматологічній галузі, а саме в ортопедії для виготовлення зубних протезів з нанесенням керамічного покриття. Застосування Co–Cr–Mo сплаву в стоматологічній імплантації обумовлено високим рівнем значень механічних властивостей та показників зносостійкості в поєднанні з малим коефіцієнтом температурного розширення та біосумісністю.

В роботі проведені дослідження кобальт-хромового сплаву Co–Cr–Mo після зупинки в процесі друку та порівняння характеристик сплаву у стані, отриманому за раціональних умов друку.

Метою даної роботи є дослідження впливу разової зупинки в процесі виготовлення деталі за SLM-технологією на механічні властивості зразків з Co–Cr–Mo сплаву, щоб встановити придатність до експлуатації деталей, які мають таку особливість.

Матеріал та методика досліджень. В роботі були досліджені випробувані зразки на розтяг, виготовлені на машині для 3-D друку Alfa-150D виробництва «АЛТ Україна» з металевого порошку кобальт хромового сплаву Co–Cr–Mo наступного хімічного складу, мас. %: 17,79 Cr; 12,63 Ni; 2,35 Mo; 0,78 Mn; 0,64 Si; C 0,016, гранулометричний аналіз представлено на рис. 1.

Металографічні шліфи виготовляли за стандартними методиками з застосуванням алмазних паст. Металографічні дослідження проводились з застосуванням світлових мікроскопів «Neophot 30» і «Axiovert 200M MAT» для визначення щільності зразків. Розрахунок розмірів та кількості пор та оксидів проводився за допомогою програмного модулю «ImageJ». Гранулометричний аналіз був проведений на растровому електронному мікроскопі PEM 106.

Були виготовлені три дослідні циліндричні зразки для випробування на розтяг за ISO 6892:2019 з діаметром робочої зони 5 мм. При побудові зразки були розташовані в робочому просторі в вертикальному положенні, контрольована зупинка протягом 24 год була виконана на висоті 18 мм робочої зони, загальна довжина якої складає 28 мм (рис. 2). Раціональні параметри друку були встановлені у роботі [17]: нанесеному шарі завтовшки – 20 мкм; відстань між треками – 0,1 мм, потужність – 130 Вт, швидкість проходу про-

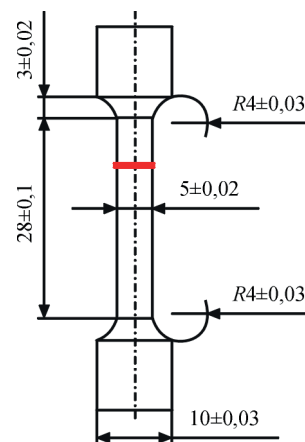


Рис. 2. Схема розташування місця контрольованої зупинки друку випробувального зразка

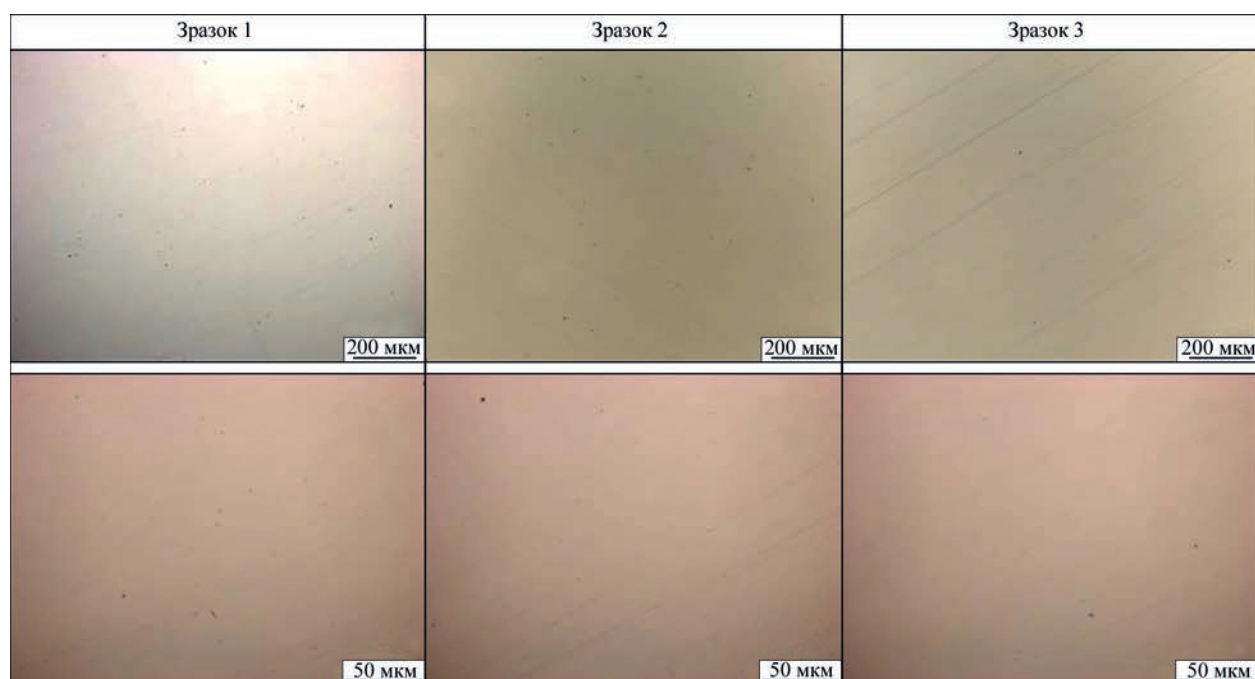


Рис. 3. Мікроструктура дослідних зразків в області зупинки

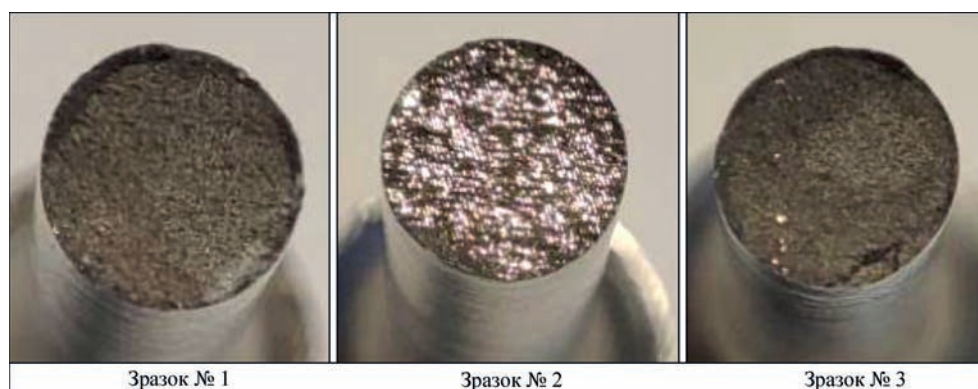


Рис. 4. Злами дослідних зразків з контрольованою зупинкою

меню – 900 мм/с. Механічна обробка зразків до чистових розмірів проводилась з застосуванням токарного верстату HAAS ST10.

Механічні властивості визначали при випробуванні на розтяг за стандартною методикою на машині «РНУВЕ».

Результати досліджень. Дослідження зразків в полірованому стані показали, що всі вони мають щільність близько ~99,97 % (рис. 3), в більшості випадків дефектами є окремі глобулярні пори ді-

аметром 1...2 мкм. За результатами досліджень встановлено, що на мікроструктурному рівні не виявлено жодних дефектів впливу зупинки на суцільність дослідних зразків.

За результатами візуально-оптичного контролю руйнування дослідних зразків № 1 та 3 відбулось поза місцем контрольованої зупинки, а поверхня зламу мала в'язку структуру. Слід зазначити, що руйнування дослідного зразка № 2 відбулось в області

Механічні властивості дослідних зразків, виготовлених зі сплаву Co–Cr–Mo сплаву за SLM-технологією у вихідному стані з механічною обробкою робочої зони

Номер п/п	Стан	σ_b , МПа	$\Delta\sigma_{вб}$, %	δ_3 , %	$\Delta\delta_3$, %	ψ , %	$\Delta\psi_6$, %	Джерело
1	З зупинкою	1067,6	+5,6	6,9	+0,5	13,9	+14,3	–
2	->-	895,2	-11,1	2,6	-62,0	9,4	-21,0	–
3	->-	1060,1	+4,9	11	+37,6	12,3	+3,25	–
Середнє		1007,6	0	6,86	0	11,9	0	–
4	Без зупинки	1157	-0,19	1,8	-74,13	17,9	+23,78	[17]
5	->-	1162	+0,23	8,7	+25	10,1	-30,15	[17]
6	->-	1159	-0,02	10,4	+49,42	15,4	+6,50	[17]
Середнє		1159,3	0	6,96	0	14,46	0	[17]

контрольованої зупинки та мала блискучий злам з видимою характерною текстурою треків (рис. 4).

За результатами аналізу значень механічних властивостей (таблиця) встановлено, що значення механічних властивостей зразків з контрольованою зупинкою зазнають змін в порівнянні з вихідним станом без контрольованої зупинки [17].

Співставний аналіз середніх значень тимчасового опору всіх дослідних зразків з контрольованою зупинкою дозволяє встановити зменшення показників на 13 % порівняно зі станом без зупинки виготовлення. Середні значення відносно подовження дослідних зразків з зупинкою зазнають незначних змін (~ 1 % порівняно зі станом без зупинки). При аналізі зміни середніх значень відносного звуження встановлено, що для дослідних зразків з контрольованою зупинкою спостерігається зменшення даної характеристики на ~17 %, порівняно зі зразками без зупинки в процесі виготовлення. Також слід зазначити, що дослідні зразки з контрольованою зупинкою мають великі розбіжності значень в рамках дослідження, а саме: тимчасовий опір –11,1...+4,9 %, відносне подовження –62...+37,6 %, відносне звуження –21...+14,3 % в порівнянні зі зразками, що виготовлялись без зупинки – 0,19...+0,23 %, +1,8...+10,4 %, –30,15...+23,78 % відповідно. Мала розбіжність значень вказує на стабільність процесу виготовлення зразків та циклу нагрів-охолодження при виготовленні. Значне зниження механічних властивостей зразку № 2, що був виготовлений з зупинкою та зруйнувався по місцю її розташування вказує на те, що використання деталей з таким дефектом виробництва має бути суттєво обмеженим, відповідно до можливого значного знеміцнення та окрихчення виробу.

Висновки

1. В результаті аналізу значень механічних властивостей встановлено, що тимчасовий опір дослідних зразків з контрольованою зупинкою зі сплаву Co–Cr–Mo, виготовленого за SLM-технологією, зазнає зменшення в порівнянні зі зразками, виготовленими без контрольованої зупинки – на ~13 %, відносне подовження – на ~1 % та відносного звуження – на ~17 %.

2. Встановлено, що для дослідних зразків з зупинкою в процесі виготовлення відхилення від середніх значень складало: для тимчасового опору ~11 %, відносного подовження ~62 % та відносного звуження ~21 %. Це обумовлено руйнуванням одного зі зразків в місці зупинки.

3. Використання деталей з дефектом виробництва (зупинка) має бути суттєво обмеженим, відповідно до можливого значного знеміцнення та окрихчення виробу.

Список літератури/References

1. Mahoney, M.W. (1989) *Superplastic Properties of Alloy 718*. «Superalloy 718 Metallurgy and Applications». Eds. E.A. Loria, TMS, 391–405.
2. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., Badyuk, S. (2022) *Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine*. Kyiv, Naukova Dumka. 116p. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>
3. Conner, B.P., Manogharan, G.P., Martof A.N. et al. (2014) Making sense of 3-D printing; map of additive manufacturing products and services. *Additive Manufacturing*, 1–4, 64–74.
4. Viňáš, J., Brezinová, J., Brezina, J., Maruschak, P.O. (2019) Structural and Mechanical Features of Laser-Welded Joints of Zinc-Coated Advanced Steel. *Materials Science*, 55.
5. Dudda, W. (2019) Influence of High Temperatures on the Mechanical Characteristics of 26H2MF and ST12T STEELS. *Materials Science*, 55.
6. Frazier, W.E. (2014) Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, 23, 6, 1917–1928.
7. Коваленко В.С., Головка Л.Ф., Меркулов Г.В., Стрижак А.И. (1981) *Упрочнение деталей лучом лазера*. Київ, Техніка. Kovalenko, V.S., Golovko, L.F., Merkulov, G.V., Strizhak, A.I. (1981) *Strengthening of parts by laser beam*. Kyiv, Tekhnika [in Russian].
8. Kruth, J.-P., Leu, M.-C., Nakagawa, T. (1998) Progress in additive manufacturing and rapid prototyping, *CIRP Ann.-Manuf. Technol.*, 47, 2, 525–540.
9. Kamath, C. (2016) Data mining and statistical inference in selective laser melting. *Int J. Adv. Manuf. Technol.*, 86, 1659–1677.
10. Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В. (2021) Вплив параметрів SLM-процесу на формування області кордонів деталей з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718. *Космічна наука і технологія*, 27, 6 (133), 105–114. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>
11. Adzhamskiy, S.V., Kononenko, G.A., Podolskiy, R.V. (2021) Influence of parameters of SLM-process on formation of boundary area of parts from heat-resistant nickel alloy Inconel 718. *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya*, 27(6), 105–114. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>
12. Williams, C.B., Mistree, F., Rosen, D.W. (2005) Towards the design of a layerbased additive manufacturing process for the realization of metal parts of designed mesostructured. *Proc. 16th Solid Free. Fabr. Symp.*, 217–230.
13. Loh, L.-E., Chua C.-K., Yeong W.-Y. et al. (2015) Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 80, 288–300.
14. Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В. (2020) Вплив технологічних параметрів SLM-процесу на пористість металовиробів. *Автоматичне зварювання*, 10, 14–20. <https://doi.org/10.37434/as2020.10.03>
15. Adzhamskiy, S.V., Kononenko, G.A., Podolskiy, R.V. (2020) Influence of technological parameters of SLM-process on porosity of metal products. *The Paton Welding J.*, 10, 13–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.10.03>
16. (2002) ASM Metals Handbook V.2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International.
17. Callister, W.D., Callister, Jr W.D. (2000) *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Interactive: Text, 5th Edition*. Wiley.
18. Adjamskiy, S.V., Sazanishvili, Z.V., Tkachov, Y.V. et al. (2021) Influence of the Time Interval between the Deposition of Layers by the SLM Technology on the Structure and Properties of Inconel 718 Alloy. *Mater Sci* 57, 9–16. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00508-3>
19. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., Baduk, S. (2022) Studying the Influence of Orientation and Layer Thickness on the Physico-Mechanical Properties of Co–Cr–Mo Alloy Manufactured by the SLM Method. *Science and Innovation*, 18(5), 85–94. <https://doi.org/10.15407/scine18.05.085>

INFLUENCE OF A STOP IN THE PROCESS OF MELTING ON MECHANICAL PROPERTIES OF SPECIMENS FROM THE Co–Cr–Mo ALLOY MADE BY SLM TECHNOLOGY

S.V. Adzhamskyi^{1,2}, G.A. Kononenko^{1,3}, R.V. Podolskyi^{1,3,4}

¹LLC “Additive Laser Technologies of Ukraine”, 31 v Serhiy Podolynskiy Str., 49000, Dnipro, Ukraine

²Institute of Transport Systems and Technologies of NASU, 5 Pysarzhevskiy Str., 49000, Dnipro, Ukraine

³Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of NASU, Akademik Starodubov Sq., 49000, Dnipro, Ukraine

⁴Ukrainian State University of Science and Technologies, 4 Haharina Prosp., 49000, Dnipro, Ukraine

In the modern manufacturing of parts of metal powder, the method of Selective Laser Melting (SLM) has become widespread. In Ukraine, the LLC “Additive Laser Technologies of Ukraine” is engaged in the development of equipment for manufacturing parts of metal powders by SLM technology. Nowadays, for this equipment, the relevant task is the development of a procedure for choosing the parameters of the process of melting metal powder, providing the necessary mechanical and service properties of parts. For the investigations, three experimental cylindrical specimens of Co–Cr–Mo alloy were made in the vertical direction for tensile test according to ISO 6892:2019 – with a diameter of the working zone of 5 mm, with a controlled stop at a height of 18 mm from the beginning of the working zone, the total length of which is 28 mm. As a result of the analysis of the values of mechanical properties, it was found that the ultimate strength of the experimental specimens of Co–Cr–Mo alloy made by SLM technology with a controlled stop during 24 h decreases compared to the specimens made without a controlled stop — by ~13 %, relative elongation — by ~1 % and reduction in area — by ~17 %. It was found that for the experimental specimens with a stop in the manufacturing process, the deviation from the average values was: for ultimate strength ~11 %, relative elongation ~62 % and reduction in area of ~21 %. This is predetermined by failure of one of the specimens at the place of a stop. The use of parts with a production defect (stop) should be significantly restricted respective to a probable significant softening and embrittlement of a product. 17 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: selective laser melting, controlled stop, Co–Cr–Mo alloy, mechanical properties, density

Надійшла до редакції 16.06.2023

