УДК 663.516.23523
DOI: 10.62717/2221-4550-2025-1-106

Подольський Р.В.
ТОВ «Адитивні лазерні технології України»
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України
ORCID 0000-0002-0288-0641
E-mail: rostislavpodolskij@gmail.com

Аджамський С.В.
ТОВ «Адитивні лазерні технології України»
Інститут транспортних систем і технологій НАН України
ORCID 0000-0002-6095-8646
E-mail: info@alt-print.com

Кононенко Г.А.
ТОВ «Адитивні лазерні технології України»
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
ORCID 0000-0001-7446-4105
E-mail: perlit@ua.fm

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ТА ТЕРМІЧНОМУ ОБРОБЛЕНІ СПЛАВУ LPBF-ALSI10MG

Анотація. При виготовлені за технологією LPBF мікроструктура сплаву AlSi10Mg через високі швидкості охолодження під час кристалізації значно відрізняється від тієї, що отримують при литті, основна відмінність — значне розчинення кремнію в алюмінієвій матриці. Після термічної обробки LPBF AlSi10Mg за режимами T3, T4, T5 і T6 формування структури та властивостей визначається впливом початкової структури.

Ключові слова: лазерне плавлення в порошковому шарі LPBF, сплав AlSi10Mg, мікроструктура, термічна обробка, механічні властивості.

R. Podolskyi
LLC "Additive Laser Technologies of Ukraine"
Iron and Steel Institute of Z.I.Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID 0000-0002-0288-0641
E-mail: rostislavpodolskij@gmail.com

S. Adzhamskyi
LLC "Additive Laser Technologies of Ukraine"
Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID 0000-0002-6095-8646
E-mail: info@alt-print.com

G. Kononenko
LLC "Additive Laser Technologies of Ukraine"
Iron and Steel Institute of Z.I.Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine
Dnipro University of Technology
ORCID 0000-0001-7446-4105
E-mail: perlit@ua.fm

FEATURES OF THE FORMATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES DURING CRYSTALLIZATION AND HEAT TREATMENT OF THE LPBF-ALSI10MG ALLOY

Abstract. When manufactured using LPBF technology, the microstructure of the AlSi10Mg alloy due to high cooling rates during crystallization is significantly different from that obtained during casting, the main difference is the significant dissolution of silicon in the aluminum matrix. After heat treatment of LPBF AlSi10Mg using T3, T4, T5 and T6 modes, the formation of the structure and properties is determined by the influence of the initial structure.

Keywords: laser powder bed melting LPBF, AlSi10Mg alloy, microstructure, heat treatment, mechanical properties.

Адитивне виробництво (AM) є однією з найбільш перспективних технологій сучасного промислового виробництва. Воно базується на пошаровому додаванні матеріалу, що дозволяє виготовляти складні конструкції без необхідності використання цілого парку дорогих інструментів [1]. Однією з ключових технологій AM є лазерне плавлення в порошковому шарі (LPBF), який використовує металевий порошок та лазерний промінь для створення щільних виробів із заданими механічними властивостями.

Вироби, які створені способом LPBF, мають мікроструктурні відмінності порівняно з литими аналогами. Це відбувається через високу швидкість охолодження (10^5 — 10^7 K/s) [1], яка сприяє значному розчиненню кремнію в алюмінієвій матриці сплаву AlSi10Mg. У деяких дослідженнях зазначається, що розчинність Si у LPBF AlSi10Mg може досягати 6-8 мас.% [2]. В той час, як рівноважна фазова діаграма Al–Si вказує, що при 200 °C розчинність Si майже нульова, що пояснює необхідність ізотермічної обробки для контрольованого засвоєння кремнію з алюмінієвої матриці [2-3].

Алюмінієві сплави, особливо AlSi10, знаходять широке застосування в автомобільній та аерокосмічній галузях через їхнє високе співвідношення міцності до ваги [2]. Сплав AlSi10 характеризується високою текучістю під час затвердіння завдяки значному вмісту кремнію, що допомагає уникнути гарячого розтріскування та зменшити пористість. Проте даний сплав не є ідеальним для термооброблених виробів, оскільки висока температура обробки викликає укрупнення кремнієвої фази, що знижує міцність і підвищує пластичність [2]. Додавання магнію (Mg) у сплав AlSi10Mg дозволяє підвищити його міцність після термообробки, зокрема за режимом T6.

Висока швидкість охолодження під час LPBF формує дрібнозернисту метастабільну мікроструктуру, що забезпечує високу міцність при низькій або помірній пластичності. Взаємопов'язана евтектична сітка Al–Si у матриці алюмінію суттєво зміцнює матеріал. Однак термічна обробка дозволяє модифікувати мікроструктуру, покращуючи пластичність за рахунок руйнування евтектичної сітки та укрупнення кремнієвих частинок.

Дослідження впливу термічної обробки на LPBF-AlSi10Mg свідчать про різні варіанти підходів [2-3]. Наприклад, відпуск T4 (обробка при температурі вище 500 °C, що

призводить до розчинення фаз) забезпечує найвищу пластичність. Відпал при 300 °C використовується для зняття залишкових напружень і гомогенізації мікроструктури. Відпуски T5 і T6 підвищують міцність, але зменшують пластичність через утворення фаз Mg-Si. режими відпалу, такі як T4, сприяють досягненню оптимального балансу між міцністю та пластичністю матеріалу.

Таким чином виходячи з вищезазначеного встановлено, що висока швидкість охолодження з рідкого стану LPBF-AlSi10Mg сприяє формуванню метастабільної мікроструктури з високою міцністю, однак для досягнення оптимальних механічних характеристик необхідне застосування термічної обробки. Подальші дослідження спрямовані на оптимізацію параметрів LPBF та термічної обробки для досягнення найкращих механічних властивостей компонентів є актуальним питанням сучасного матеріалознавства в LPBF процесах.

Список використаних джерел

1. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskyi, R., Badyuk, S. Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka, 2022. 116p. [in Ukrainian]. DOI: 10.15407/978-966-00-1856-3
2. Ejiofor J, Reddy R. Developments in the processing and properties of particulate Al-Si composites. JOM. 1997; 49: 31-37.
3. Niu G, Wang Y, Zhu L, Ye J, Mao J. Fluidity of casting Al–Si series al-loys for automotive light-weighting: a systematic review. Mater Sci Technol. 2022; 38(13): 902-911.