УДК 669.34
Єфременко Б.В.[1], Чабак Ю.Г.[1], Зурнаджи В.І.[1], Петришинець І.[2], Федун В.І.[1], Пастухова Т.В.[1], Єфременко В.Г.[1]
[1] ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Маріуполь
[2] Institute of Materials Research, Slovak Academy of Sciences, Kosice, Slovakia

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ SLM-ДРУКОВАНОЇ СТАЛІ 316L БІОМЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ПІСЛЯ ІМПУЛЬСНО-ПЛАЗМОВОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ

Досліджували біомедичну сталь 316L, отриману 3D-друком за технологією SLM (Selective Laser Melting). У вихідному (друкованому) стані зразки сталі малу значну неоднорідність мікроструктури, яка складалась із світлих та темних ділянок довільної форми, розташованих у хаотичному порядку (рис. 1). При більшому збільшенні темні ділянки набували форми завіхрених «крапель» перетином у кілька десятків мікрометрів. В окремих ділянках було виявлено пори, тріщини із вкритою окислами поверхнею, а також частки вихідного порошку, частково оплавлені лазерним променем.

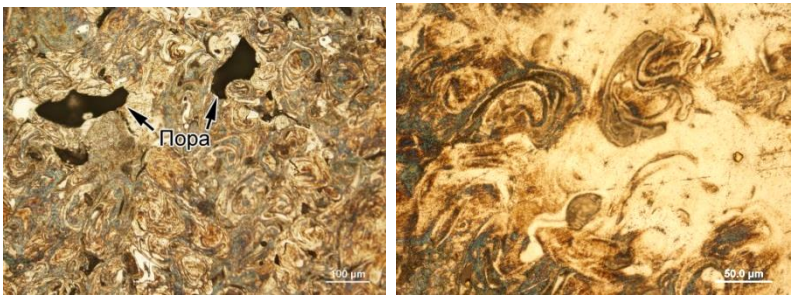


Рисунок 1 – Мікроструктура 3D-друкованої сталі 316L

Неоднорідність мікроструктурного стану 3D-друкованих зразків сталі 316L була пов’язана із нерівномірним розподілом хімічних елементів в об’ємі зразку. Енерго-дисперсійним аналізом було встановлено, що світлі ділянки в середньому вміщують (в мас. %) 29,38±1.0 Ni; 18,10±0,35 Cr; 2,65±0,13 Mo; 2,68±0,62 Ti; 2,30±0,24 Nb; 0,38±0,01 Al; 43,40±1,79 Fe. В темних ділянках зафіксовано: 25,52±1.0 Ni; 18,30±0,16 Cr; 2,65±0,25 Mo; 1,13±0,95 Ti; 1,98±0,15 Nb; 0,25±0,07 Al; 48,83±0,57 Fe. Таким чином, світлі ділянки мають вищій вміст нікелю (на ~4 %), титану (на ~1,5 %) та ніобію (на ~0,4 %). Натомість, в темних ділянках на ~5 % було підвищено вміст заліза.

Результати наноіндентування сталі 316L наведено в таблиці 1. Видно, що значення твердості та модуля Юнга мають досить великий розкид, що пов’язано із особливостями формування структури при SLM процесі.

Таблиця 1 – Результати наноіндентування 3D-друкованої сталі 316L

Параметр	Модуль Юнга, ГПа	Твердість, ГПа
Розкид значень	143-243,983	1,286-6,079
Середнє значення	195,198	3,257
Довірчій інтервал	3,68	0,13

Зразки сталі 316L були піддані імпульсно-плазмовій обробці із застосуванням електротермічного аксіального плазмового генератору [1] Після однократного плазмового імпульсу з напругою розряду 2,8 кВ на поверхні зразку утворився тонкий шар товщиною 3-5 мкм більш темного кольору із чіткою границею. Під границею в структурі були наявні полоси ковзання всередині аустенітних зерен, які, напевно, виникли внаслідок термічної деформації при плазмовому нагріві. Плазмова обробка із напругою розряду 4,5 кВ привела до оплавлення поверхні з утворенням зміненого шару товщиною 8-12 мкм з нерівними контурами, без чіткої границі із основою. Шар мав дисперсну структуру, яка після травлення набула темного кольору; зеренна структура в шарі не виявлялась.

Плазмова обробка майже не вплинула на модуль Юнга та твердість 3D-друкованої сталі 316L, але суттєво підвищила однорідність розподілу властивостей: значення модуля Юнга становили 183,590-203,261 ГПа, твердості – 3,240-3,609 ГПа. Оскільки сталь 316L відноситься до аустенітного класу, то підвищення твердості в окремих ділянках структури можна пояснити виникненням додаткових викривлень кристалічної решітки внаслідок накопичення дефектів будови при термічній деформації впродовж циклу «плазмовий нагрів – охолодження», а також розчиненням карбідів титану в аустеніті при оплавленні, що підвищило твердорозчинну складову міцності сталі.

Робота виконана в рамках проекту 2020.02/0064 Національного Фонду дослідження України. Чабак Ю.Г. вдячна за підтримку в рамках НДР (№ держреєстрації 0119U1000080).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Efremenko V.G., Chabak Yu.G., Fedun V.I., K.Shimizu, Pastukhova T.V., Petryshynets I., Zusin A.M., Kudinova E.V., Efremenko B.V. Formation mechanism, microstructural features and dry-sliding behaviour of “Bronze/WC carbide” composite synthesised by atmospheric pulsed-plasma deposition. *Vacuum.* 2021. vol. 185. 110031.