

*М.І. Папечко, д.т.н.
(Політехніка Любелська, Польща)
А.О. Юрчук, к.т.н., О.В. Тісов, к.т.н.
(Національний авіаційний університет, Україна)*

Евтектичні сплави системи Fe-C-Mn-B для 3Д друку

Евтектичні сплави системи Fe-C-Mn-B (на основі заліза) мають широкі межі евтектичної концентрації, високу частку карбідів у своєму складі. Висока твердість і зносостійкість дозволяють використовувати їх у найбільш навантажених вузлах авіаційної техніки. Зокрема – для відновлення зношених поверхонь тертя ковзання опор шасі. Кристалізація евтектик у вузькому діапазоні температур і високі ливарні якості цих сплавів, а також значні товщини нанесеного покриття за один технологічний прохід робить їх перспективними для використання в 3Д принтерах.

Аддитивні технології виробництва з використанням металевих матеріалів - це подальший розвиток відомих процесів зварювання, що використовуються протягом десятиліть для відновлення зношених деталей машин. З технології швидкої побудови прототипів вони перетворилися на швидку технологію виробництва, або 3Д друк.

Проблемою був зварювальний шов. Зона теплового впливу зменшувала механічні властивості деталей, що з'єднуються. Ножова корозія призводила до руйнування зварних швів, так само як і відпускна крихкість. Нещодавно плавлення металів стало настільки контрольованим, що тепер можна виготовляти найскладніші форми з незначною витратою матеріалу. У науковій літературі повідомляється, що виготовлений адитивно евтектичний алюмінієвий сплав AlSi12 має в 3-4 рази кращу міцність на розрив, ніж звичайна відливка у піщану форму [1, 2]. Для виготовлення масивних деталей сприятливим є те, що вища швидкість охолодження приводить до вищої міцності на розрив, але дещо знижує втомну міцність [2]. Тим не менше, обидві ці характеристики набагато вищі, ніж у литого сплаву. Вища швидкість охолодження сприяє утворенню дуже тонких коралоподібних евтектичних кремнієвих евтектик у близько- евтектичному сплаві AlSi10Mg. Його твердість, міцність на стиснення є вищими, ніж у литого аналога. Наночастинки також сприяють зміцненню сплаву. Термічна обробка після виготовлення матеріалу порушує та огрублює цю мікроструктуру. [3, 4]. У сплавів, що зміцнюються старінням, мікроструктури в литому вигляді та виготовлені на 3Д принтері дуже подібні.

Досліджувалися також інші типи евтектикию Наприклад Fe-Ti, що є перспективними для високотемпературних застосувань. Евтектика Fe-Fe₂Ti (17,6% Fe) може бути отримана з надтонкою мікроструктурою і є перспективною для високотемпературних застосувань шляхом спрямованого наплавлення [5]. Сплав мав завтектичний склад. Моделювання мікроструктури, підтвержене експериментальними дослідженнями, вказує на можливість

отримання пластинчастої надтонкої евтектики. Евтектичний сплав Ti-32.5Fe [6] вивчався, щоб довести, що швидке охолодження може призвести до утворення надтонкої мікроструктури пластинчастого типу. Використовуваний метод виготовлення - лазерне плавлення порошкової суміші (Laser-Power Bed Fusion) дозволяє отримати надтонку структуру в евтектичному сплаві β -Ti/TiFe, забезпечуючи 30% гарячої деформації при пресуванні без утворення тріщин. Ризичнення кисню в сплаві становило близько 0,45%. Структура сплаву складається з металеві матриці β -Ti/TiFe та дендритної фази η -Ti₄Fe₂O_x. Ця фаза утворює внутрішній каркас з дуже високими температурними характеристиками та несучою здатністю [6].

Багатокомпонентні евтектичні сплави також є хорошими кандидатами для адитивного виробництва. Зміни хімічного складу дозволяють змінювати будь-яку властивість, зберігаючи інші постійними. Попередньо леговані порошки евтектичного сплаву V-9Si-5B оплавливали лазером [7]. Незважаючи на те, що сплав має дещо надмірну пористість, отримана тонка евтектична структура має складові мікрононого риня. Інша тонка евтектична структура була отримана за допомогою формування складних форм за допомогою лазера (laser net shape engineering) високоентропійного сплаву Al_xCoCrFeNi_{2.1} [8, 9]. Збільшення вмісту алюмінію (від 0,6 до 1,1%) може змінити евтектичний тип з дендритного на пластинчастий. Навіть використання елементарного порошку дозволяє отримати однорідні сплави з точно контрольованим складом. На диво, але переплавлення виготовленого сплаву різко знижує міцність на розрив і пластичність. Повторне нагрівання матеріалу під час осадження локалізує термічно викликану пластичність поблизу меж зерен. Таким чином, циклічне повторне нагрівання осадженого матеріалу може значно покращити пластичність евтектичних матеріалів.

Евтектоїдні сплави на основі заліза широко використовуються як конструкційні матеріали, тоді як евтектичні сплави в основному застосовуються у вигляді покриттів. Однак для багатьох застосувань (масивні ріжучі інструменти, вставки для фрез), що працюють при великих питомих навантаженнях, покриття працюють незадовільно. Краще використовувати сипучий матеріал. Механічна обробка матеріалів, зміцнених карбідними евтектиками, є великою проблемою через їх високу твердість, а виготовлення за допомогою адитивних технологій є хорошим рішенням. На відміну від звичайного лиття, очікується більш тонка мікроструктура і, отже, кращі експлуатаційні характеристики. При наплавленні евтектичних матеріалів матеріал основи слід нагрівати, щоб уникнути тріщин [10]. У деяких дослідженнях зносостійкість інструментальних сталей H13 становить лише 1/3 аналогів, виготовлених традиційно [11].

Для виготовлення матеріалу з необхідною зносостійкістю цементит і бориди Cr₂B, Fe₂B та FeB дуже перспективні, оскільки вони дуже тверді, стійкі до стирання та корозії, термостійкі. Крім того, додавання марганцю покращує пластичність цементиту та покращує властивості евтектичної суміші. Марганець розчиняється у Fe у твердому стані і розширює температурно-концентраційну область карбідів (Fe, Mn) 3С. Одночасно це зменшує розмір частинок карбиду і робить їх розподіл у матеріалі матриці більш рівномірним.

Одним із завдань сучасних досліджень є підвищення межі текучості і одночасно забезпечення високої твердості. З точки зору механічних властивостей та зносостійкості, економії коштів та доступності, система Fe-C-V виявляється дуже ефективною, після неї йде система Fe-C-Mn. Оскільки марганець розчинний у залізі, очевидним є поєднання цих двох систем у систему Fe-C-Mn-V та отримання їх переваг в одному матеріалі.

Евтектичний сплав на основі системи Fe-C-Mn-V легований Cr у вигляді основної суміші було використано для наплавлення зношеної частини ножа для подрібнення автомобільних покришок (рис. 1). Стандартний ніж працює не більше 3 дб, в той час як відновлений за допомогою технології 3Д друку ніж пропрацював 45 дб і зберіг працездатність. Добре видно товщину наплавленого шару – понад 10 мм.



Рис. 1. Ніж для подрібнення відпрацьованих автомобільних шин після 45 дб роботи

Висновки. Сплави на основі заліза системи Fe-C-Mn-V мають високу зносостійкість і працюють 15 разів довше за звичайні конструкційні матеріали в умовах тертя. Високі ливарні властивості і здатність до зварювання дозволяють отримувати наплавки суттєвої товщини – більше 10 мм. Сплави даної системи є перспективними для використання в адитивних технологіях виробництва.

Список літератури

1. S. Siddique, M. Imran, E. Wycisk, C. Emmelmann, F. Walther. Influence of process-induced microstructure and imperfections on mechanical properties of AlSi12 processed by selective laser melting, *J. Mater. Proc. Technol.* 221 (2015) 205–213, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.023>.
2. S. Siddique, M. Imran, E. Wycisk, C. Emmelmann, F. Walther. Fatigue Assessment of Laser Additive Manufactured AlSi12 Eutectic Alloy in the Very High Cycle Fatigue (VHCF) Range up to 1E9 cycles, *Mater. Today: Proc.* 3 (2016) 2853–2860, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.07.004>.
3. M. Albu, R. Krisper, J. Lammer, G. Kothleitner, J. Flocchi, P. Bassani. Microstructure evolution during in-situ heating of AlSi10Mg alloy powders and

additive manufactured parts *Add. Man.* 36 (2020) 101605, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101605> .

4. S.I. Shakil, A. Hadadzadeh, B. Shalchi Amirkhiz, H. Pirgazi, M. Mohammadi, M. Haghshenas Additive manufactured versus cast Al Si10Mg alloy: Microstructure and micromechanics, *Res. Mater.* 10 (2021) 100178, <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100178> .

5. G. Requena, K. Bugelnig, F. Sket, S. Milenkovic, G. Rödler, A. Weisheit, J. Gussone, J. Haubrich, P. Barriobero-Vila, T. Puzsai, L. Gránásy, A. Theoflotos, J.C. da Silva, U. Hecht, Ultrafine Fe-Fe₂Ti eutectics by directed energy deposition: Insights into microstructure formation based on experimental techniques and phase field modelling *Add. Man.* 33 (2020) 101133, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101133> .

6. J. Gussone, K. Bugelnig, P. Barriobero-Vila, J. Cesar da Silva, U. Hecht, C. Dresbach, F. Sket, P. Cloetens, A. Stark, N. Schell, J. Haubrich, G. Requena, Ultrafine eutectic Ti-Fe-based alloys processed by additive manufacturing – a new candidate for high temperature applications, *Appl. Mater. Today* 20 (2020) 100767, <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100767> .

7. S.-K. Rittinghaus, K. Gruberc, P. Veitd, A. Weisheit, M. Krüger Printability J. Schmelzera, Microstructural evolution of a near-eutectic three-phase Vbased alloy *Add. Man.* 34 (2020) 101208, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101208> .

8. J. Joseph, M. Imran, P.D. Hodgson, M.R. Barnett, D.M. Fabijanic, Towards the large-scale production and strength prediction of near-eutectic Al_xCoCrFeNi_{2.1} alloys by additive manufacturing, *Man. Lett.* 25 (2020) 16–20, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.06.002>.

9. B. Dong, Z. Wang, Z. Pan, O. Muransky, C. Shen, M. Reid, B. Wu, X. Chen, H. Li, On the development of pseudo-eutectic AlCoCrFeNi_{2.1} high entropy alloy using Powder-bed Arc Additive Manufacturing (PAAM) process, *Mat. Sci. & Eng. A* 802 (2021) 140639, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140639>.

10. L. Xue, J. Chen, S.H. Wang, Freeform laser consolidated H13 and CPM 9V tool steels, *Metallography, Micro. Anal.* 2 (2013) 67-78, <https://doi.org/10.1007/s13632-013-0061-0>.

11. Y. Zhang, F. Cheng, S. Wu, Improvement of pitting corrosion resistance of wire arc additive manufactured duplex stainless steel through postmanufacturing heat-treatment, *Mater. Charact.* 171 (2020) 110743, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110743>