

**ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ  
МІКРОМЕХАНІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ СПЛАВУ ALSI10MG В УМОВАХ  
АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА**

Буштрук С.І.<sup>1</sup> [ORCID], Миронова Т.М.<sup>2</sup> [ORCID]

<sup>1</sup> Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

<sup>2</sup> Український державний університет науки і технологій, д.т.н., проф, Україна

**Анотація.** Для конструкційних алюмінієвих сплавів, таких як силумін, обов'язковим контролем якості є механічні випробування на розтяг із визначенням параметрів міцності та пластичності. Обов'язковість технологічного контролю для кожної партії може бути усунена за умови отримання стабільних повторюваних результатів, що можна досягти, зокрема, при застосуванні програмованих режимів виготовлення за адитивною технологією PBF-LB/M. Заміною експериментального визначення механічних властивостей може стати їх моделювання через параметри структури. У роботі виконується дослідження існуючої моделі мікромеханічного зміцнення сплаву за правилом сумішей, що розраховується на основі параметрів структури сплаву, визначених на зразках, що були виготовлені в різних умовах та за різних технологічних параметрів процесу. Розраховані показники межі плинності порівнюються з результатами виконаних випробувань на розтяг. Було визначено, що модель має бути доопрацьована через суттєву похибку, а способи визначення структурних параметрів матеріалу мають бути максимально спрощеними для можливості ширшого впровадження.

**Ключові слова:** лазерне плавлення металевого порошкового шару, силумін, мікроструктура, міцність, моделювання властивостей.

У практиці прийнятно-здавальних випробувань партій металопродукції з алюмінієвих сплавів обов'язковими є механічні випробування на розтяг з визначенням параметрів міцності та пластичності у випадках, коли передбачається використання для виробів, що мають забезпечувати заданий рівень конструктивної міцності. У разі застосування технології PBF-LB/M розміри партій для виготовлення заготовок чи деталей обмежуються розмірами робочої камери установки, що визначає кількість виробів, які можуть бути виготовлені за один виробничий цикл. Відповідно до усталених положень різних нормативних документів у сфері металургії і

машинобудування, партією вважають вироби, виготовлені з однієї сировини за однакових умов і одночасно. Водночас остання умова може бути переглянута для програмованих режимів виготовлення за адитивною технологією PBF-LB/M, що забезпечує високу повторювальність результатів, за умови сталих параметрів процесу. Таким чином, обов'язкові механічні випробування кожної окремої партії можуть бути замінені періодичними випробуваннями. У перспективі можливий перехід до контролю лише структурних параметрів, тоді як для визначення механічних властивостей доцільно буде використовувати розрахункові моделі, засновані на цих структурних параметрах.

Розрахункове визначення міцності сплаву можливе із застосуванням спрощених аналітичних моделей, що базуються на правилі сумішей. Для оцінювання межі плинності матеріалу узагальнюються внески різних механізмів мікромеханічного зміцнення, характерних для сплавів із певним структурним станом. Зазначені механізми детально описані в оглядовій роботі [1], а у роботі [2] було реалізовано моделювання за цим підходом.

Спираючись на результати вищезазначених робіт, виконано моделювання для визначення межі міцності за структурними параметрами, а також проведено експериментальну перевірку отриманих значень.

Горизонтальні зразки сплаву AlSi10Mg були виготовлені на двох машинах PBF-LB/M із різними технічними параметрами: з фокусним діаметром лазера ~0,05 мм (№1) і ~0,1 мм (№2), що впливало на вибір енергетичних параметрів процесу та температурні градієнти під час плавлення і кристалізації.

Визначення структурних параметрів, необхідних для виконання розрахунків, здійснювали із застосуванням растрової електронної мікроскопії (РЕМ-106И, детектор вторинних електронів) та рентгеноструктурного аналізу (ДРОН-3, випромінювання  $K\alpha$ -Co). Зазначимо, що визначення розмірів наночасток кремнію та їх об'ємної частки в комірках  $\alpha$ -Al не проводили через обмеження роздільної здатності мікроскопа. Дані щодо внеску механізму зміцнення дисперсними частками були запозичені з роботи [2].

Застосована аналітична модель мікромеханічного зміцнення сплаву AlSi10Mg, виготовленого за технологією PBF-LB/M, має вигляд [2]:

$$\sigma_y = f_{cell} \cdot (\sigma_0 + \Delta\sigma_{preci} + \Delta\sigma_{bound} + \Delta\sigma_{ss} + \Delta\sigma_{disloc}) + f_{net} \cdot \sigma_{load}, \quad (1)$$

$\sigma_y$  – межа плинності алюмінієвого сплаву, що визначається;

$\sigma_0$  – межа плинності чистого алюмінію;

$\Delta\sigma_{preci}$  – зміцнення дисперсними частинками за механізмом Орована;

$\Delta\sigma_{bound}$  – зміцнення за рахунок подрібнення структури за ефектом Холла-Петча;

$\Delta\sigma_{ss}$  – зміцнення за рахунок переходу кремнію в твердий розчин;

$\Delta\sigma_{disloc}$  – зміцнення за рахунок накопичення дислокацій;

$\sigma_{load}$  – вклад каркасу кремнію, що прийнято для умов рівномірного навантаження одночасно з  $\alpha$ -Al;

$f_{net}$  і  $f_{cell}$  – об’ємна частка каркасу кремнію та комірок  $\alpha$ -Al відповідно.

Алгоритми розрахунку за окремими механізмами зміцнення, а також інформація щодо застосованих констант детально наведено в роботах [1-3].

За результатами виконаного моделювання (див. табл. 1) для зразків №1 і №2 отримані значення межі плинності ( $\sigma_y^{розрах}$ ) суттєво відрізняються від експериментальних ( $\sigma_y^{експ}$ ), визначених у ході контрольних випробувань: розбіжність сягає 64–68% порівняно з 21%, отриманими при моделюванні авторами роботи [2].

Таблиця 1

Результати моделювання межі плинності та фактичні результати випробування у порівнянні з попереднім дослідженням.

| Зразок      | $\sigma_0$ , МПа | $\Delta\sigma_{preci}$ , МПа | $\Delta\sigma_{bound}$ , МПа | $\Delta\sigma_{ss}$ , МПа | $\Delta\sigma_{disloc}$ , МПа | $\sigma_{load}$ , МПа | $f_{net}$ , % | $\sigma_y^{розрах}$ , МПа | $\sigma_y^{експ}$ , МПа |
|-------------|------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------|---------------------------|-------------------------|
| №1          | 10               | 158                          | 72                           | 159                       | 178                           | 380                   | 22,5          | 525                       | 320                     |
| №2          |                  |                              | 70                           | 105                       | 187                           |                       | 22,8          | 489                       | 291                     |
| Дослід. [2] |                  |                              | 66                           | 71                        | 37                            |                       | 12,0          | 346                       | 286                     |

Значні розбіжності пов’язані зі стрімким зростанням впливу окремих механізмів зміцнення, а насамперед твердорозчинного ( $\Delta\sigma_{ss}$ ) та дислокаційного ( $\Delta\sigma_{disloc}$ ). Обидві зазначені складові визначено із застосуванням параметрів структури, отриманих за результатами рентгеноструктурного аналізу, що зумовлює необхідність їх детальнішого порівняння з відповідними параметрами, наведеними в роботі [2].

Розрахунок зміцнення за рахунок твердого розчину виконували на основі даних щодо концентрації кремнію в кристалічній ґратці  $\alpha$ -Al, що визначали по зміні параметра кристалічної ґратки відносно чистого алюмінію, яка має лінійну залежність аж до концентрації в твердому розчині на рівні 11%, на основі даних з монографії [4]. Параметр кристалічної ґратки у свою чергу визначався на основі усереднених даних шести характерних піків на рентгенограмі, що забезпечувало доволі високу точність. В роботі [2] визначення концентрації кремнію в  $\alpha$ -Al виконувалось методом енергодисперсійної спектроскопії в просвічувальному електронному мікроскопі. В обох випадках отримані значення концентрації кремнію перебувають у діапазонах, характерних для технології PBF-LB/M, і не викликають сумнівів.

Розрахунок зміцнення за рахунок накопичення дислокацій виконували на основі даних щодо їх щільності, яку визначали через мікродеформацію, розраховану за методом Уільямсона-Холла. У роботі [2] ці дані щодо щільності дислокацій були запозичені з іншого дослідження, що виконувалось на зразках надрукованих в зовсім інших умовах. Оскільки саме параметр вмісту дислокацій впливає на найбільш вагомий, згідно табл. 1, механізм структурного зміцнення ( $\Delta\sigma_{\text{disloc}}$ ), то його визначення на однакових зразках має критичне значення.

Попри значну похибку у визначенні межі плинності на зразках №1 і №2 спостерігається зв'язок у співмірному зростанні з фактичними експериментальними даними — в 1,07 та 1,1 раз відповідно.

Отримані фактичні експериментальні показники межі плинності на зразках №1 і №2 знаходяться на гранично високому рівні та навіть перевищують діапазон вказаний в стандарті VDI 3405 Blatt 2.1 [5], що визначений для зразків надрукованих в горизонтальному положенні (239–292 МПа).

### **Висновки**

1. Застосовано аналітичну модель для визначення межі плинності сплаву AlSi10Mg, що підтвердило коректність тенденції взаємозв'язку механізмів

структурного мікромеханічного зміцнення з експериментально визначеною характеристикою. Водночас розраховані значення межі плинності характеризуються доволі високою похибкою порівняно з даними експерименту, яка в умовах даного дослідження зросла до 64–68% порівняно з результатами попередніх досліджень інших авторів (21%). Це зумовлено отриманням параметрів структури для розрахунків, відмінних від наведених у попередніх роботах, що може бути пов'язано з відмінністю методів їх визначення. Отримані результати свідчать про необхідність подальшого вдосконалення моделі для забезпечення достовірності розрахунків.

2. Методи дослідження структурних параметрів потребують стандартизації та максимального спрощення з метою розширення можливостей застосування цієї моделі не лише для наукового прогнозування, але й для здійснення контролю якості показників механічних властивостей.

#### **ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE**

1. Li, Feng, et al. "Eutectic aluminum alloys fabricated by additive manufacturing: A comprehensive review." *Journal of Materials Science & Technology* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2025.06.016>
2. Macías, Juan Guillermo Santos, et al. "Influence on microstructure, strength and ductility of build platform temperature during laser powder bed fusion of AlSi10Mg." *Acta Materialia* 201 (2020): 231-243. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.10.001>
3. Zhao, Lv, et al. "Review on the correlation between microstructure and mechanical performance for laser powder bed fusion AlSi10Mg." *Additive Manufacturing* 56 (2022): 102914. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102914>
4. Mondolfo, L.F. (1976) *Aluminum Alloys: Structure and Properties*. Butterworths and Co., Ltd., London, 806. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-408-70932-3.50404-6>
5. VDI 3405 Blatt 2.1 Additive Fertigungsverfahren - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) - Materialkenndatenblatt Aluminiumlegierung AlSi10Mg. -2020-08 – 7.

#### **STUDY OF THE APPLICABILITY OF A MICROMECHANICAL STRENGTHENING MODEL TO ALSI10MG ALLOY UNDER ADDITIVE MANUFACTURING CONDITIONS**

Serhii Bushtruk, Tetiana Myronova

**Abstract.** *For structural aluminum alloys such as silumin, tensile testing to determine strength and ductility parameters is a mandatory quality control procedure. The*

*requirement for technological control of each batch can be reduced provided that stable and reproducible results are achieved, which can be ensured, in particular, by using programmed manufacturing regimes in additive PBF-LB/M technology. The experimental determination of mechanical properties may be replaced by their modeling based on structural parameters. This work investigates an existing micromechanical strengthening model of the alloy based on the rule of mixtures, calculated using structural parameters determined from samples produced under different conditions and process parameters. The calculated yield strength values are compared with the results of tensile testing. It was found that the model requires further refinement due to a significant error, and the methods for determining the structural parameters of the material should be simplified as much as possible to enable wider implementation.*

**Keywords:** *laser-based powder bed fusion, silumin, defects in materials, norms and methods of control, strength, modeling of properties.*