

<https://doi.org/10.15407/fmmit2026.42.174>

Вплив лазерного опромінення на структуру аморфного сплаву Fe₈₆B₄

Назар Сембратович¹, Юлія Никируй²

¹Аспірант, кафедра фізики металів, Львівський Національний Університет ім. Івана Франка, вул. Кирила та Мефодія 8, 79005 Львів, Україна, e-mail: Nazar.Sembratovych@lnu.edu.ua

²к. ф.-м. н., кафедра фізики металів, Львівський Національний Університет ім. Івана Франка, вул. Кирила та Мефодія 8, 79005 Львів, Україна, e-mail: yuliya.nykyruy@lnu.edu.ua

Методом X-променевої дифракції досліджено структура загартованих з рідкого стану аморфних сплавів Fe₈₆B₁₄. Вивчено залежність структури цих сплавів залежно від товщини стрічки. Проведено вивчення впливу лазерного опромінення на структуру аморфних стрічок різної товщини. Показано, що після лазерної обробки у стрічок різної товщини не спостерігається значних фазових і структурних змін, а має місце зростання ступеня мікронеоднорідності.

Ключові слова: аморфні металеві сплави, лазерне опромінення, градієнтна структура, ближній порядок, параметри структури

Вступ. Незважаючи на значний прогрес у дослідженні та впровадженні аморфних металевих сплавів (АМС) на основі заліза, як наприклад Fe-B чи Fe-Si-B, прогнозування та цілеспрямоване керування їхніми механічними й магнітними властивостями залишається актуальною проблемою металофізики. Особливістю промислового отримання таких матеріалів методом надшвидкого загартування розплаву (спінінгування) є виникнення суттєвого градієнта швидкостей охолодження по товщині формованої стрічки (зазвичай ~30 мкм). Це призводить до формування структурної неоднорідності від розупорядкованого стану зі значним вільним об'ємом на контактній поверхні до частково релаксованої структури з ближнім порядком на вільній стороні стрічки.

Аморфні сплави системи Fe-B відносяться до найбільш вивчених сплавів і є базовими для багатокомпонентних сплавів з важливими для практичного застосування властивостями. Результати структурних досліджень вказують, що ближній порядок є чутливим до концентрації елементів, температури та технологічних умов отримання [1, 2,3]. Найбільше вивчена структура евтектичного та біля евтектичних сплавів, оскільки сплави з цього інтервалу концентрацій мають найвищу здатність до склоутворення (Glass-forming ability, GFA) [4, 5, 6].

В роботі [7] вивчали особливості кристалізації сплавів залізо – бор залежно від вмісту бору і різних матеріалів диску, на якому гартувався розплав, а також для контактної та вільної сторін сплаву. Зокрема, було встановлено, що

Назар Сембратович, Юлія Никируй

Вплив лазерного опромінення на структуру аморфного сплаву Fe₈₆B₄

для сплавів з вмістом 20 і 25 ат.% бору і на контактній стороні мідного диску процес кристалізації є дещо сповільнений. Цей ефект не спостерігався для сплаву з вмістом 17 ат.% бору, а також для стрічок отриманих на сталевому диску. Цю особливість пов'язують з різним складом поверхонь, оскільки стрічка, отримана спінінгуванням, не є однорідною по всій товщині. Додатковим чинником, що ускладнює прогнозування властивостей металевих стекол, є виражений розмірний ефект. Зокрема, на прикладі аморфних плівок на основі Co та Fe показано, що зміна товщини зразка суттєво змінює кінетику нанокристалізації, щільність зародкоутворення, а також зумовлює нелінійну зміну магнітних характеристик через перебудову доменної структури (появу блохівських стінок) [7, 8]. Це підтверджує, що товщина аморфного шару є самостійним термодинамічним та структурним параметром, який необхідно враховувати як при напиленні плівок, так і при пошаровому аналізі масивніших стрічок

Завдання цієї роботи є провести пошарові дослідження структурних градієнтів швидко загартованого аморфного сплаву Fe₈₆B₁₄ і дослідити процес лазерно-індукованої кристалізації залежно від товщини.

1. Методика експерименту

Аморфний сплав Fe₈₆B₁₄ було отримано методом загартування з розплаву у вигляді стрічки товщиною близько 25 мкм і шириною 5 мм. Для встановлення залежності структури від розмірних факторів проводилось вивчення структурних параметрів стрічок різної товщини. Для цього проводилось механічне зменшення товщини плівки шляхом прецизійного полірування, контролюючи процес таким чином, щоб не було напружень і локальних перегрівів. Для опромінення зразків у режимі сканування використовували імпульсний волоконний лазер із довжиною хвилі $\lambda = 1064$ нм та максимальною потужністю $P = 50$ Вт. Під час опромінення зразки стрічки закріплювали на металевій підкладці та розміщували у фокальній площині лінзи в повітряній атмосфері. Режими опромінення було вибрано на основі наших попередніх досліджень з врахуванням методик інших авторів [9, 10, 11]. Параметри опромінення відображено у таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри лазерного опромінювання.

№	Швидкість променя, мм/с	Потужність лазера, Вт	Частота імпульсів, кГц	Енергія імпульсу, мДж	Крок імпульсу, мкм	Крок сканування, мкм	Густина енергії, Дж/мм ²
1	2000	25	20	1.25	100	50	0.15

2. Результати і Обговорення

Пошарові дослідження структурних градієнтів традиційно проводять шляхом зменшення товщини методом механічного шліфування зразків. Проте, аморфні системи є метастабільними, і локальні пластичні деформації зсуву та

тепловиділення у результаті тертя, які супроводжують процес шліфування, здатні впливати на структуру металевого скла. Тому шліфування проводили вручну з інтенсивним охолодженням водою і мінімальним натиском, щоб уникнути локального перегріву.

Дифракційні криві інтенсивності розсіяння від зразків аморфного сплаву $Fe_{86}B_{14}$ (вихідного та шліфованих до товщин 20 та 27 мкм) наведено на рис. 1. Як видно, на фоні широких максимумів аморфної фази спостерігається ряд дифракційних максимумів (110), (200), (211) та (220), що відповідають відбиванням від ОЦК- ґратки $\alpha(Fe)$. Отже, дані сплави у свіжозагартованому стані характеризуються аморфно-кристалічною структурою, що проявляється у формуванні нанокристалів твердого розчину на основі $\alpha(Fe)$, розподілених в залишковій аморфній фазі. Видно, що для всіх трьох товщин (38, 27 і 20 мкм) зберігається аморфна структура, хоча проявляються деякі особливості в залежності цих кривих від товщини. Особливо чутливим є профіль другого максимуму, особливості якого пов'язані зі структурною релаксацією. Водночас, перший максимум практично залишається незмінним, вказуючи на те, що на рівні ближнього порядку суттєвих змін не спостерігається.

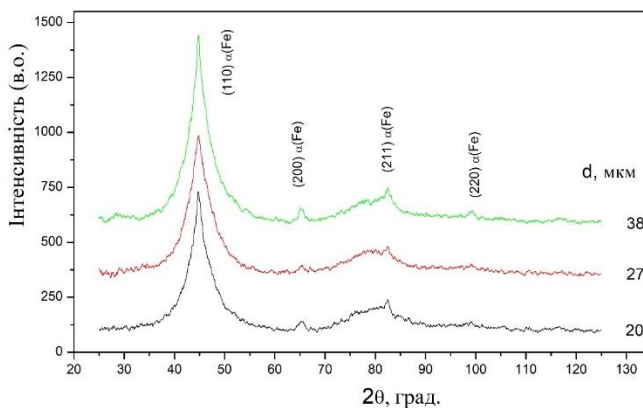


Рис.1 Криві інтенсивності розсіяння X-променевого випромінювання для товщин 38, 27 і 20 мкм сплаву $Fe_{86}B_{14}$

Оскільки основна інформація про структуру відображена у першому головному максимумі, з метою більш детальнішого аналізу цей максимум представлено у вигляді суперпозиції максимумів, що відповідають розсіянню від аморфної та нанокристалічної фази (Рис. 2). Профіль максимумів описували функцією Лоренца. Об'ємну частку нанокристалічної фази (X) оцінювали за співвідношенням інтегральної інтенсивності максимумів (110) $\alpha(Fe)$ та залишкової аморфної фази, а ефективний розмір нанокристалів (L) визначали за півшириною (β) максимуму (110) $\alpha(Fe)$ відповідно до наведених формул:

$$X = \frac{I_c}{I_a + I_c} \qquad L = \frac{\lambda}{\beta \cdot \cos(\theta)}$$

Як випливає з даних, наведених на рис. 2, максимум залишкової аморфної фази зміщений в бік менших кутів розсіяння, що свідчить про збільшення середньої міжатомної відстані порівняно з кристалічною фазою, що вказує на збагачення аморфної фази атомами бору. Слід відзначити, що параметр елементарної комірки ОЦК-фази $\alpha(\text{Fe})$ практично не залежить від товщини зразків і становить $a=0.28675$ нм. Враховуючи вкрай низьку розчинність атомів бору в залізі (наприклад при $T=500^\circ\text{C}$ розчинність Bв $\alpha(\text{Fe})$ не перевищує 0,001 ат. %), дане значення відповідає параметру комірки чистого $\alpha(\text{Fe})$. Як видно, з даних наведених в табл. 2, найбільший розмір нанокристалів $\alpha(\text{Fe})$ ($L=33,0$ нм) спостерігається у вихідному зразку товщиною 38 мкм, тобто в приконтактній зоні зразка.

В той же час, у шліфованих зразках розмір нанокристалів зменшується, зокрема в зразку шліфованому до товщини 27 мкм він становить $L=12,0$ нм. Крім того, слід відзначити незначне збільшення їх об'ємної частки від 0,07 до 0,09 при зменшенні товщини від 38 до 20 мкм. Таким чином, можна стверджувати, що при віддаленні від контактної поверхні зразка спостерігається збільшення густини центрів кристалізації фази $\alpha(\text{Fe})$, що й призводить до зменшення їх розмірів та зростання об'ємної частки.

Криві інтенсивності розсіяння X-променевого випромінювання використовували для розрахунку структурних факторів та функцій атомного розподілу (Рис. 3). Слід відзначити, що положення основного максимуму (s_1) не залежить від товщини зразків, отже зменшення товщини стрічки шліфуванням не призводить до суттєвих змін в атомному розподілі. Однак, спостерігається зменшення висоти основного максимуму $a(s_1)$ до 3,06 при зменшенні товщини зразка до 20 мкм. Можна припустити, що це пов'язано зі зменшенням ступеня топологічного та хімічного впорядкування.

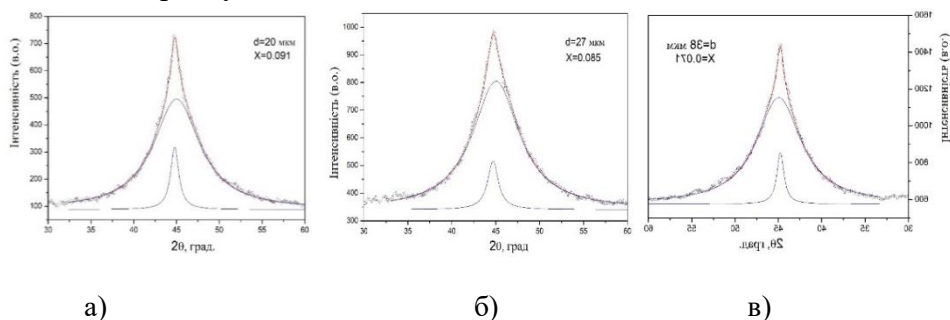
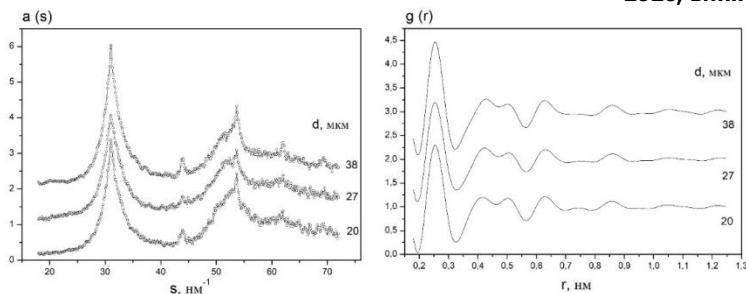


Рис. 2. Профіль основного максимуму кривих інтенсивності розсіяння для різних товщин стрічки.



а) б)
Рис. 3. Структурні фактори (а), та парні функції атомного розподілу сплаву Fe₈₆B₁₄ різної товщини

На рис. 3. представлені структурні фактори і парні функції атомного розподілу розраховані методом прямого Фур'є-перетворення. Як показали результати аналізу, середня міжатомна відстань ($R_1 \approx 0.253$ нм) майже не залежить від товщини зразків, однак як і для структурних факторів спостерігається зменшення висоти основного максимуму $g(R_1)$ зі зменшенням товщини зразків. Крім того, для аморфно-кристалічних зразків зазнає зміни профіль 2-го максимуму функції $g(R)$, що проявляється в чіткому розділенні на два підмаксимуми. Крім того, спостерігається тенденція до зменшення 1-го координаційного числа до $N_1 \approx 9$ порівняно зі зразками з повністю аморфною структурою ($N_1 \approx 10-11$), що можна пояснити збагаченням аморфної фази атомами бору внаслідок формування нанокристалічної ОЦК-фази $\alpha(\text{Fe})$. Результати розрахунків наведені у Таблиці 2.

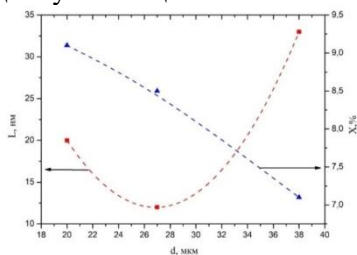


Рис. 4. Залежність середнього розміру нанокристалів L та частки кристалічної фази X від товщини стрічки.

Таблиця 2
Параметри ближнього порядку аморфного сплаву Fe₈₆B₁₄ після механічної обробки

№	d , мкм	s_1 , нм ⁻¹	$a(s_1)$	R_1 , нм	$g(R_1)$	N_1	L_c , нм	X , %
1	20	31,0	3,07	0,254	2,30	9,0	20,0	9,1
2	27	31,1	3,38	0,253	2,20	9,5	12,0	8,5
3	38	31,0	4,04	0,254	2,46	9,0	33,0	7,1

Назар Сембратович, Юлія Никируй

Вплив лазерного опромінення на структуру аморфного сплаву $\text{Fe}_{86}\text{B}_{14}$

d – товщина фольги, s_l – положення основного максимуму структурного фактора АМС, $a(s_l)$ – висота основного максимуму структурного фактора АМС, R_l – радіус 1-ї координаційної сфери, $g(R_l)$ – висота основного максимуму парної функції атомного розподілу, N_l – координаційне число (число атомів в 1-й координаційній сфері), L – середній розмір нанокристалів первинної фази (α -Fe).

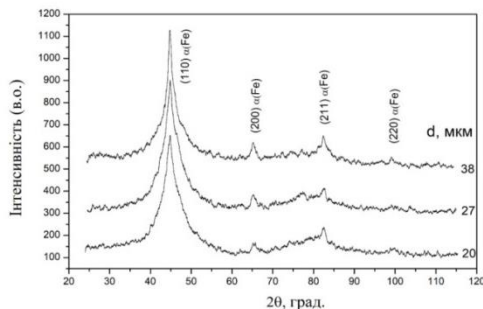


Рис. 5. Криві інтенсивності розсіяння зразків аморфного сплаву $\text{Fe}_{86}\text{B}_{14}$ після лазерної обробки.

На Рис. 5 наведено криві інтенсивності розсіяння зразків аморфного сплаву $\text{Fe}_{86}\text{B}_{14}$ після зменшення товщини та лазерної обробки. Як видно, лазерна обробка не призводить до суттєвих змін у якісному фазовому складі зразків. Як і після зменшення товщини, структура зразків залишається аморфно-кристалічною, що виявляється у присутності на дифрактограмах максимумів (110), (200), (211), (220) ОЦК-фази Fe на фоні широких максимумів залишкової аморфної фази. На Рис. 5. профіль головного максимуму представлений у вигляді суперпозиції максимумів (110) кристалічного твердого розчину Fe та дифузного максимуму від залишкової аморфної фази. Зміщення кутового положення максимуму аморфної фази у бік більших кутів розсіяння вказує на її збагачення атомами B в процесі нанокристалізації. Даний метод аналізу дозволяє оцінити як ефективні розміри зерен (L) нанокристалічної фази так і її об'ємну частку (X).

На Рис. 6а. наведено структурні фактори зразків після лазерної обробки, розрахованих з кривих інтенсивності розсіяння. Потрібно відзначити, що положення основного максимуму структурного фактора вихідного зразка майже не змінюється під час лазерної обробки. Однак лазерна обробка зразків, зішліфованих до товщин 27 та 20 мкм призводить до збільшення висоти основного максимуму $a(s)$ (Табл. 2). Можна припустити, що зменшення товщини зразків перед лазерною обробкою сприяє більш ефективному накопиченню енергії лазерного випромінювання і відповідно більш суттєвих змін ближнього порядку в аморфній фазі. На Рис. 6б наведені парні функції атомного розподілу, розраховані методом прямого Фур'є-перетворення структурних факторів. Як видно з рисунку 6б спостерігається суттєве розширення 2-го максимуму парних функцій розподілу атомів після лазерної обробки, що вказує на розширення спектру міжатомних відстаней, крім того, прослідковується тенденція до збільшення радіусів 1-ї координаційної сфери та

відповідних координатних чисел. Тому можна припустити, що обробка зразків лазерним випромінюванням сприяє формуванню мікронеоднорідної полікластерної структури, яка складається з мікроскопічних областей з різними значеннями параметрів ближнього атомного порядку.

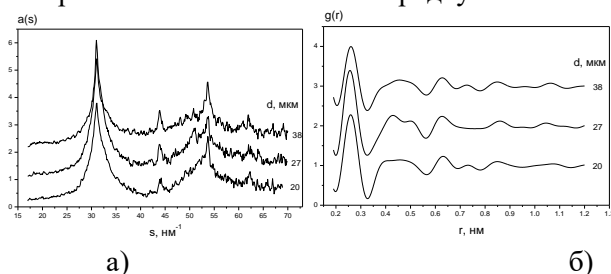


Рис. 6 Структурні фактори аморфного сплаву $\text{Fe}_{86}\text{B}_{14}$ (а) та парні функції атомного розподілу сплаву $\text{Fe}_{86}\text{B}_{14}$ (б) після лазерної обробки.

Висновки. Встановлено, що зменшення товщини аморфних стрічок $\text{Fe}_{86}\text{B}_{14}$ методом механічного шліфування не призводить до значних змін структури, яка залишається аморфною. Лазерна обробка виявилась ефективною для модифікації структури і при оптимальних режимах такої обробки зберігається аморфна структура, що забезпечує унікальність фізичних властивостей при різних товщинах. Таким чином, товщина аморфних плівок є важливим параметром який потрібно враховувати при лазерній модифікації. Показано, що найбільш чутливі до товщини аморфної металічної стрічки $\text{Fe}_{86}\text{B}_{14}$ є частка нанокристалів та їх розмір.

Ця робота була виконана за підтримки Національного фонду наукових досліджень України, грант № 2025.07/0286

Література

- [1] Challapalli Suryanarayana, AkihisaInoue. *MetallicGlasses – ULLMANN’S Encyclopedia of industrial Chemistry* - 2012
- [2] Feng, Z.; Geng, H.; Zhuang, Y.; Li, P. *Progress, Applications, and Challenges of Amorphous Alloys: A Critical Review. Inorganics* 2024, 12, 232. <https://doi.org/10.3390/inorganics12090232>
- [3] Судзукі К., Фудзіморі Х., Хасімото К. *Аморфні метали* / [за ред. Масумото Ц.; пер. з яп.]. — М.: Металургія, 1987. — 328 с.
- [4] *Аморфні металеві сплави* / [за ред. Ф. Е. Любарського; пер. з англ.]. — М.: Металургія, 1987. - 584 с
- [5] Белоцький А. В. *Структура і фізичні властивості швидкозагартованих сплавів* / А. В. Белоцький, Ю. А. Куницький, Я. П. Грицьків. — К.: КІП, 1984. — 120 с.
- [6] Шпак А. П. та ін. *Моделювання аморфних сплавів із використанням випадкових щільних упаковок твердих сфер // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології.* — 2004. — Т. 2, №2. — С. 689–694.
- [7] H.F. Li, R.V. Ramanujan, *In situ hot stage transmission electron microscopy observations of nano crystal formation in a $\text{Co}_{65}\text{Si}_{15}\text{B}_{14}\text{Fe}_4\text{Ni}_2$ amorphous magnetic alloy*, *Thin Solid Films*, Volume 514, Issues 1–2, 2006, Pages 316–322, ISSN 0040-6090, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.02.093>.
- [8] X.J. Luo, Peiheng Zhou, H.P. Lu, J.L. Xie, L.J. Deng, *Study on ferromagnetic properties in FeCo-based amorphous thin films with different thickness*, *Thin Solid*

Films, Volume 619, 2016, Pages 227-230, ISSN 0040-6090,
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.10.061>.

- [9] Mudry S. I. et al. Influence of pulselaserir radiatio nonstructure and mechanical properties of amorphous Fe_{73.1}Nb₃Cu_{1.0}Si_{15.5}B_{7.4} alloy // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. — 2013. — 61 (1). — P. 7–11
- [10] Mudry S. I., Nykyruy Yu. S., Borisyuk A. K. Effect of laser processing on the structure and magnetic characteristics of an amorphous Fe_{73.5}Nb₃Cu₁Si_{15.5}B₇ alloy // Inorganic Materials. — 2014. — Vol. 50, №4. — P. 357–364.
- [11] Nykyruy, Y., Sembratovych, N. Structure transformation in amorphous Fe-B ribbon under laser scanning. // Physics and Chemistry of Solid State, 2024, 25(4), pp.718–722.
<https://doi.org/10.15330/pcss.25.4.718-722>

Effect of laser irradiation on the structure of the amorphous Fe₈₆B₄ alloy

Nazar Sembratovych, Yuliia Nykyruy

The structure of Fe₈₆B₁₄ amorphous alloys, obtained by means of rapid cooling from liquid state, has been studied by means X-ray diffraction method. The structure dependence of this alloy on thickness of sample was studied. It is also studied the effect of laser irradiation on the structure of amorphous ribbons with different thicknesses. It was shown that after laser treatment, no significant phase and structural changes, but the degree of microheterogeneity is increased..

Отримано 22.05.2026р