

2. Мовчан О.В., Черноіваненко К.О. Закономірності формування трифазного композиту при науглецюванні сплавів системи Fe-W-V-C // *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2019. № 5-6. С. 76-83; <https://doi.org/10.34185/0543-5749.2019-5-6-76-83>

3. Мовчан О.В., Черноіваненко К.О. Утворення in situ композитів при науглецюванні хромистої сталі // *Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах-10»*. Київ, 2020. С. 48-51.

4. Мовчан О.В., Черноіваненко К.О. Аналіз структури науглецюваного сплаву P12Ф5К5 // *Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні»*. Київ, 2019. С. 142-144.

5. Мовчан О.В., Черноіваненко К.О. Аналіз фазових перетворень в залізних сплавах при науглецюванні // *XV Міжнародна конференція «Стратегія якості в промисловості і освіті»*. Дніпро-Варна, 2019. С. 133-138.

6. Movchan O.V., Chornoivanenko K.O. In situ Composites: A Review // *Progress in Physics of Metals*. 2021. Vol. 22. No. 1. P. 58-77

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-72>

## **DETERMINATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF AMORPHOUS COATINGS OF THE Fe-Cr-B and Fe-Cr-Ni-Co-B SYSTEMS BY THE INDENTATION METHOD**

## **ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АМОРФНИХ ПОКРИТТІВ СИСТЕМ Fe-Cr-B та Fe-Cr-Ni-Co-B МЕТОДОМ ІНДЕНТУВАННЯ**

**Chugunova S.I.,**

*PhD (Physics and Mathematics),  
Frantsevich Institute for Problems  
of Materials Science of the National  
Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine*

**Чугунова С.І.,**

*к.ф.-м.н., Інститут проблем  
матеріалознавства імені  
І.М. Францевича Національної  
академії наук України,  
м. Київ, Україна*

**Golubenko O.A.,**

*PhD (Physics and Mathematics),  
Frantsevich Institute for Problems  
of Materials Science of the National  
Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine*

**Голубенко О.А.,**

*к.ф.-м.н., Інститут проблем  
матеріалознавства імені  
І.М. Францевича Національної  
академії наук України,  
м. Київ, Україна*

**Kuprin V.V.,**

*Frantsevich Institute for Problems  
of Materials Science of the  
National Academy of Sciences  
of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine*

**Купрін В.В.,**

*Інститут проблем  
матеріалознавства імені  
І.М. Францевича Національної  
академії наук України,  
м. Київ, Україна*

**Lukianov O.I.,**

*Frantsevich Institute for Problems  
of Materials Science of the  
National Academy of Sciences  
of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine*

**Лук'янов О.І.,**

*Інститут проблем  
матеріалознавства імені  
І.М. Францевича Національної  
академії наук України, м. Київ,  
Україна*

**Melnik V.H.,**

*Frantsevich Institute for Problems  
of Materials Science  
of the ational Academy of Sciences  
of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine*

**Мельник В.Х.,**

*Інститут проблем  
матеріалознавства імені  
І.М. Францевича  
Національної академії наук України,  
м. Київ, Україна*

Аморфні металеві сплави (АМС) типу метал-металоїд на основі Fe-B, до складу яких входять перехідні метали VI групи (Cr, Mo), характеризуються високою міцністю, корозійною стійкістю, термічною стабільністю та тріщиностійкістю, що необхідно для їх використання у якості як конструкційних матеріалів, так і покриттів. З масивних АМС виготовляють безпосередньо різні інструменти та покриття для них. Механічні властивості покриттів зазвичай оцінюються тільки визначенням твердості. Пластичність не визначається через те, що не можливо отримати подовження до руйнування при випробуванні покриттів на розтяг. Однак, розроблені авторами методики індентування [1, 2] дозволяють визначати пластичність  $\delta_H$  та напруження плину  $\sigma_{SH}$  покриттів та зміцнених поверхневих шарів.

Мета дослідження полягала у визначенні величини твердості HV, характеристики пластичності  $\delta_H$  та напруження плину  $\sigma_{SH}$  методом індентування для оцінки механічної поведінки аморфних покриттів та визначення їх оптимального складу.

Були досліджені покриття з аморфних порошків систем Fe-Cr-B та Fe-Cr-Ni-Co-B, нанесені газотермічним напиленням на підкладку з маловуглецевої сталі. Вимірювання твердості здійснювали при кімнатній температурі на мікротвердомірі ПМТ-3, за допомогою алмазного індентора Вікерса при навантаженні  $P = 1$  Н, що є

оптимальним навантаженням для отримання якісних відбитків твердості без тріщин та руйнувань. При індентуванні індентором Віккерса характеристику пластичності визначали за методикою, розробленою в [1], як відношення пластичної деформації до загальної деформації під індентором.

При застосуванні індентора Віккерса отримано вираз:

$$\delta_H = 1 - 14,3(1 - \nu - 2\nu^2)HV/E, \quad (1)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт Пуасона,  $E$  – модуль Юнга,  $\delta_H$  – безрозмірна величина, що змінюється від нуля, при абсолютно пружному вдавлюванні індентора, до одиниці при повністю пластичній деформації, тобто  $0 < \delta_H < 1$ .

Зі зменшенням значення  $\delta_H$  (від більш пластичних матеріалів  $\delta_{Hmax} \approx 0,99$  до менш пластичних  $\delta_{Hmin} \approx 0,36$ ) всі матеріали можуть бути розташовані в наступній послідовності ГЦК – ОЦК – ГЦУ – метали – інтерметаліди (ІМ) – АМС – квазікристали (QC) – тугоплавкі сполуки – ковалентні кристали. В таблиці наведено механічні властивості, отримані методом індентування, досліджених АМС покриттів.

Таблиця 1

**Механічні характеристики АМС покриттів, визначені методом індентування при температурі 20 °С**

Склад АМС	Товщина покриття (h), мкм	Твердість (HV), ГПа	Характеристика пластичності ( $\delta_H$ )	Параметр Тейбора (C)	Напруження плину ( $\sigma_{SH}$ ), ГПа	Модуль Юнга (E), ГПа
Fe-Cr-V	350	10	0,62	1,3	8,3	170
Fe-Cr-Ni-Co-V	750	6	0,74	1,7	5,1	147

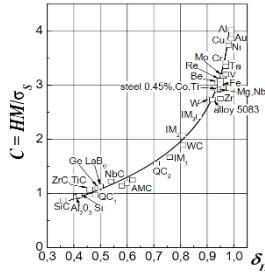
Для визначення напруження плину було використано фізичний зв'язок твердості з границею плинності  $\sigma_s$ , встановлений Тейбором [3] у вигляді:

$$HM \approx C\sigma_s,$$

де  $HM$  – твердість за Меєром (середній контактний тиск),  $C$  – параметр Тейбора.

Автори роботи [2] встановили співвідношення між  $\delta_H$  та  $C$  для матеріалів з різною кристалічною структурою та різним типом

міжатомного зв'язку (Рис. 1), що дозволяє визначати параметр Тейбора та напруження плинину  $\sigma_{SH}$  за результатами стандартного індентування.



**Рис. 1. Співвідношення між параметром Тейбора  $C = HM/\sigma_s$  та характеристикою пластичності  $\delta_H$  [1]**

Методика визначення  $\sigma_{SH}$  передбачає:

1. Визначення характеристики пластичності  $\delta_H$  за формулою (1).
2. Визначення параметра Тейбора  $C$  за градуовальник графіком (рис. 1).
3. Розрахунок  $\sigma_{SH}$  за формулою  $\sigma_{SH} = HM/C$ .

Значення  $HV$  для системи Fe-Cr-W знаходиться на рівні  $\sim 10$  ГПа, що співпадає зі значенням  $HV$ , отриманому для АМС стрічок цього ж складу,  $\delta_H \approx 0,62$ ,  $\sigma_{SH} \approx 8,3$  ГПа. Часткове заміщення Fe додаванням до складу АМС елементів з більш слабкою залежністю границі плинності (Ni та Co) призводить до зменшення  $HV \sim 6$  ГПа. При цьому значення  $\delta_H$  зростає до  $\approx 0,74$ , а  $\sigma_{SH}$  знижується до  $\approx 5,1$  ГПа. Таке поєднання значень характеристик міцності та пластичності є оптимальним для отримання якісних АМС покриттів.

**Висновки.**

1. Доведено, що при дослідженні аморфних покриттів можна використовувати метод індентування для визначення характеристики пластичності ( $\delta_H$ ) та напруження плинину ( $\sigma_{SH}$ ), що підвищує інформативність та ефективність даного методу при вивченні механічної поведінки покриттів.
2. Результати дослідження призначені для вибору оптимального складу аморфних металевих сплавів при використанні їх у вигляді покриттів.

**Перелік використаних джерел**

1. Milman Yu.V., Chugunova S.I., Goncharova I.V., Golubenko A.A. Plasticity of materials determined by the indentation method. Progress in Physics of Metals 2018, Vol.19, No.3, p. 271-306. <https://doi.org/10.15407/ufm.19.03.271>
2. Galanov B.A., Milman Yu.V., Chugunova S.I., Goncharova Application of the Improved Inclusion Core Model of the Indentation Process for the Determination of Mechanical Properties of Materials. Crystals 2017, Vol.7, No.87. p.1-13. <https://doi.org/10.3390/cryst7030087>
3. Tabor D., The Hardness of Metals; Clarendon Press: Oxford, UK, 1951.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-73>

**IMPROVING THE HOMOGENEITY OF METASTABLE  
AUSTENITE WHEN SURFACING PARTS MADE OF 110G13 STEEL**

**ПОКРАЩЕННЯ ГОМОГЕННОСТІ МЕТАСТАБІЛЬНОГО  
АУСТЕНІТУ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СТАЛІ 110Г13**

**Shalay V.O.,**

*Student, LLC "Technical university  
"Metinvest polytechnic",  
Zaporizhzhia, Ukraine*

**Шалай В.О.,**

*студент ТОВ «Технічний  
університет «Метінвест  
політехніка», м. Запоріжжя, Україна*

**Petrenchik I.V.,**

*Laboratory Assistant,  
LLC "Technical university  
"Metinvest polytechnic",  
Zaporizhzhia, Ukraine*

**Петренчик І.В.,**

*лаборант,  
ТОВ «Технічний університет  
«Метінвест політехніка»,  
м. Запоріжжя, Україна*

**Войко І.О.,**

*PhD (Engineering), Associate professor,  
LLC "Technical university  
"Metinvest polytechnic",  
Zaporizhzhia, Ukraine*

**Бойко І.О.,**

*к.т.н., доцент,  
ТОВ «Технічний університет  
«Метінвест політехніка»,  
м. Запоріжжя, Україна*

Сучасний стан гірничо-видобувної, переробної, дорожньої, будівельної та інших секторів промисловості України може суттєво