

PACS numbers: 06.60.Vz, 52.77.Fv, 61.72.Ff, 68.35.bd, 81.05.Bx, 81.20.Vj, 81.40.Pq

Структура та властивості металу, нагрітого плазмовим методом порошком швидкорізальної криці 10P6M5, модифікованим Алюмінієм або Бором

Є. Ф. Перепляотчиков, І. О. Рябцев, І. П. Лентюгов, І. І. Рябцев

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна*

В роботі експериментально досліджено вплив модифікувальних добавок Алюмінію чи то Бору у порошок швидкорізальної криці 10P6M5 на структуру та властивості металу, нагрітого плазмово-порошковим способом. Встановлено, що модифікування нагрітого металу 10P6M5 Алюмінієм у кількості 0,01–0,05% сприяє утворенню додаткових центрів кристалізації та пригніченню зростання стовпчастих кристалітів. В результаті підвищується червоностійкість нагрітої швидкорізальної криці, а міцність за згинання й ударна в'язкість зберігаються на рівні кованої швидкорізальної криці. Модифікування Бором у кількості 0,015–0,060% діє на структуру нагрітого металу 10P6M5 приблизно аналогічно Алюмінію. Однак утворення водночас бориду Fe_2B , яке супроводжується збільшенням питомого об'єму на $\cong 15$ –17%, приводить до появи значних внутрішніх напружень і зменшує міцність за згинання й ударну в'язкість нагрітого металу 10P6M5, модифікованого Бором. Збільшення стійкості різальних інструментів, виготовлених з використанням пластинок із нагрітого металу 10P6M5, модифікованого Алюмінієм або Бором, зумовлено поєднанням дрібнозернистої структури нагрітого металу з відносно тонкою карбідною сіткою та високою червоностійкістю.

Ключові слова: плазмово-порошкове нагрівання, нагрітий метал, мо-

Corresponding author: Ihor Oleksandrovych Ryabtsev
E-mail: ryabtsev39@gmail.com

*E.O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

Citation: Ye. F. Pereplyotchykov, I. O. Ryabtsev, I. P. Lentyuhov, and I. I. Ryabtsev, Structure and Properties of Metal Hard-Faced by Plasma Method with 10P6M5 High-Speed Steel Powder Modified with Aluminium or Boron, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 46, No. 3: 279–288 (2024). DOI: [10.15407/mfint.46.03.0279](https://doi.org/10.15407/mfint.46.03.0279)

дифікування, зносостійкість, червоність, механічні властивості, різальні властивості.

In this work, the effect of modifying additives of aluminium or boron in the powder of high-speed steel 10R6M5 on the structure and properties of deposited metal by the plasma-powder surfacing is studied experimentally. As established, the inoculation of the deposited metal 10R6M5 with aluminium in the amount of 0.01–0.05% promotes the formation of additional crystallization centres and suppresses the growth of columnar crystallites. As a result, the red hardness of the deposited high-speed steel is increased, and the bending strength and toughness are maintained at the level of forged high-speed steel. The inoculation with boron in the amount of 0.015–0.060% acts on the structure of the deposited metal 10R6M5 similarly to aluminium. However, the formation of Fe₂B boride, accompanied by an increase in the specific volume by $\cong 15$ –17%, leads to the appearance of significant internal stresses and reduces the bending strength and impact toughness of the deposited metal 10R6M5 modified with boron. An increase in the tool life of a cutting tool made by using plates of deposited metal 10R6M5 modified with aluminium or boron is due to the combination of a fine-grained structure of the deposited metal with a fine carbide mesh and high red hardness.

Key words: plasma-powder surfacing, deposited metal, inoculation, wear resistance, red hardness, mechanical properties, cutting properties.

(Отримано 28 березня 2023 р.; остаточн. варіант — 13 квітня 2023 р.)

1. ВСТУП

У інструментальному виробництві достатньо широко застосовуються ресурсозберігальні технології, однією з яких є технологія виготовлення біметалевого різального інструменту з використанням натоплення [1–4]. Технологічна схема виготовлення такого інструменту складається з наступних операцій: натоплення швидкорізальними або іншими інструментальними крицями заготовок із конструкційних криць, відпал натоплених заготовок, механічне оброблення їх, загартування та відпуск. Водночас натоплення виконується переважно вручну штучними електродами або електродою, що не топиться, в захисних газах з присадкою дроту чи то прутків з швидкорізальних (інструментальних) криць [3]. Відомо також механізоване натоплення різальних інструментів контактним способом [4].

Недоліками згаданих способів натоплення є:

- підвищена витрата присадкових (електродних) матеріалів із швидкорізальних криць;
- проблема забезпечення стабільної якості натопленого металу;
- великий перегрів основного металу.

Плазмове натоплення з присадкою порошку позбавлене більшо-

ти вищезгаданих недоліків. За плазмово-порошкового натоплення завдяки невеликому протопленню та незначному вигорянню легувальних елементів хемічний склад натопленого металу вже в першому шарі відповідає складу присадного порошку. Однорідність хемічного складу розтоплених порошків і стабільність режиму плазмово-порошкового натоплення забезпечують високу якість та однорідність хемічного складу натопленого металу, у тому числі типу швидкорізальних криць [2, 5].

Регулюючи швидкість подачі порошку, можна регулювати швидкість кристалізації зварювальної ванни та впливати у сприятливий бік на структуру натопленого металу [2], що можна посилити, вводячи у порошок присадки модифікувальних елементів.

Мета роботи — дослідити вплив модифікування Алюмінієм або Бором присадного порошку швидкорізальної криці 10P6M5 на технологічні й експлуатаційні властивості, а також на структуру металу, натопленого плазмовим способом.

2. МАТЕРІЯЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для досліджень обрано порошок ПР-10P6M5 з розміром частинок у 80–200 мкм, одержаний розпорошенням азотом рідкого металу, який містить (мас. частка, %): 1,0, 5,83 W, 5,40 Мо, 3,86 Cr, 1,96 V, 0,4 Si, 0,35 Ni, S і P \leq 0,03. Як модифікатори використовували Алюміній і Бор у кількості 0,01–0,05% і 0,015–0,060% відповідно, які вводили у розтоп швидкорізальної криці 10P6M5 перед розпорошенням.

Плазмово-порошкове натоплення зразків із криці Ст3 розмірами 20×50×300 мм виконували на універсальній установці ОБ 2184 конструкції ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. Висота одношарових валиків становила 5–6 мм, ширина — 9–11 мм, двошарових валиків — 8–9 мм і 12–14 мм відповідно. Струм дуги становив 160–200 А залежно від гранулометричного складу порошку, кількості шарів і швидкості натоплення; остання змінювалася в межах 6–12 м/год; швидкість подачі порошку — 3,0–3,8 кг/год.

Натоплення виконувалося без попереднього підігріву, охолодження після натоплення — на повітрі. Для металографічних досліджень з натоплених валиків вирізали зразки довжиною у 10–20 мм. Металографічні дослідження проводили на мікроскопі «Неофот». Твердість натопленого металу вимірювали на приладах Роквелл і Віккерс.

Швидкорізальні криці використовуються для виготовлення інструментів, які експлуатуються за високих швидкостей різання. Ці криці поєднують високу твердість (*HRC* 63–70), червоностійкість за температур до 700°C та підвищений опір пластичній деформації.

З урахуванням вищевикладеного, як критерії для оцінки власти-

востей модифікованих нагрітих швидкорізальних криць були обрані твердість, червоностійкість, міцність за згинання й ударна в'язкість. Крім цього, проводилися порівняльні випробування різального та фрезерувального інструментів з пластинками, які були вирізані з нагрітих валиків швидкорізальних криць, під час точіння та фрезерування.

Випробування на міцність за згинання проводили на пресі ІМ-4 з застосуванням оригінального пристосування з роликівими опорами. Зразки перерізом 3×6 мм і довжиною у 40 мм виготовляли з двошарових валиків. Навантаження зразків проводили зосередженим навантаженням, прикладеним посередині між опорами. Швидкість навантаження становила 100–150 Н/с. Значення міцності за згинання визначалося за формулою (МПа)

$$\sigma = M / W ,$$

де M — згинальний момент, що дорівнює $M = Pl/4$ [Н·м]; P — руйнівне навантаження [Н]; l — віддаль між опорами [м]; W — момент опору перерізу, рівний $W = bh^2/6$ [м³], b — ширина зразка [м]; h — висота зразка [м].

Внаслідок розкиду значень міцності під час крихкого руйнування зразків із швидкорізальних криць у кожній серії випробовувалися по 8–10 зразків, вирізаних із нагрітих валиків. З цієї ж причини для випробувань на ударну в'язкість використовували таку ж кількість зразків розміром $5 \times 5 \times 10$ мм без надрізу та маятниковий копер КМ-0,5-Т з малою величиною роботи удару.

Червоностійкість криці, чи то здатність криці зберігати високу твердість під час тривалих багаторазових нагрівань до температур у 550–650°C, має важливе значення та значною мірою визначає службові властивості швидкорізальної криці. Під час досліджень червоностійкості зразки з нагрітого металу, загартованого від 1200°C, відпускали за 560°C, після чого піддавали багаторазовому нагріванню до температур у 580, 600, 620, 640 і 660°C з витримкою 1 год. за кожної температури та подальшому охолодженню й мірнню твердості після охолодження.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В одношарових валиках, нагрітих плазмовим способом порошком швидкорізальної криці 10P6M5, твердість розподіляється практично рівномірно, а її значення знаходяться у вузьких межах — $HV 770$ – 790 (рис. 1, крива 1). Рівень твердості — достатньо високий навіть біля лінії стоплення, що свідчить про невелике переміщення основного й нагрітого металів та утворення загартованої структури з великою кількістю мартенситу. У двошарових

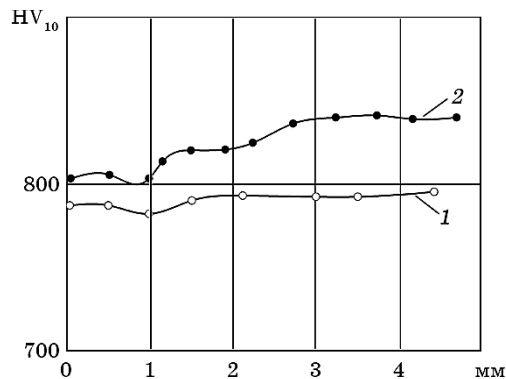


Рис. 1. Розподіл твердості по перерізу одношарового (1) і двошарового (2) валиків, нагрітих плазмовим способом порошком швидкорізальної криці 10P6M5 після відпуску за 560°C, 1 год.

Fig. 1. Distribution of hardness over the section of single-layer (1) and two-layer (2) beads plasma-surfaced with powder of high-speed steel 10P6M5 after tempering at 560°C, 1 hour.

валиках характер розподілу твердості аналогічний одношаровим, але сама твердість дещо вища. З віддаленням лінії стоплення твердість зростає до $HV\ 820\text{--}840$ (рис. 1, крива 2).

Мікроструктура немодифікованої нагрітої криці 10P6M5 має зовнішню схожість з литими структурами цієї криці, але відрізняється дезорієнтованими дендритами. За межами дендритів розташовані надлишкові карбіди та карбідна евтектика (ледебурит). Карбідна сітка порівняно товста, без скупчень карбідів (рис. 2, а).

Модифікувальна дія Алюмінію в нагрітому металі типу криці 10P6M5 проявляється у подрібненні первинної структури та дезори-

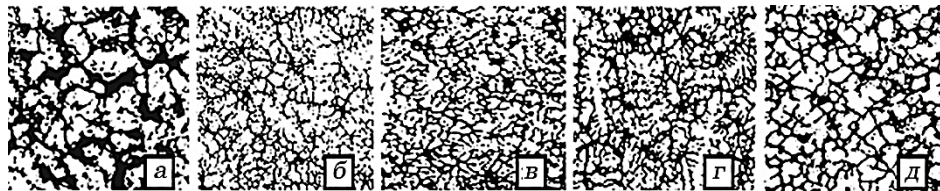


Рис. 2. Мікроструктура немодифікованого (а) та модифікованого Алюмінієм 0,01% (б) та 0,05% (в) або Бором 0,015% (г) та 0,06% (д) нагрітого металу типу криці 10P6M5 після відпуску за 560°C, 1 год. ($\times 200$).

Fig. 2. Microstructure of unmodified (a) and modified with aluminium 0.01% (b) and 0.05% (c) or boron 0.015% (d) and 0.06% (e) deposited metal of steel type 10P6M5 after tempering at 560°C, 1 hour ($\times 200$).

ТАБЛИЦЯ 1. Властивості натопленого металу типу криці 10P6M5 з модифікувальними добавками Алюмінію або Бору після повного термооброблення.

TABLE 1. Properties of deposited metal such as steel 10R6M5 with modifying additions of aluminium or boron after complete heat treatment.

Натоплена криця	Властивості			
	Твердість, <i>HRC</i>	Міцність за згинання σ_n , МПа	Ударна в'язкість <i>d</i> , Дж/см ²	Червоностійкість <i>Kp</i> , °C
10P6M5 (еталон)	62,0	2620	9,0 ± 0,5	590
10P6M5 (0,01% Al)	62,5	2620	9,0 ± 0,5	600
10P6M5 (0,05% Al)	62,8	2630	9,5 ± 0,3	610
10P6M5 (0,015% B)	63,5	1960	3,5 ± 0,5	610
10P6M5 (0,06% B)	64,0	1310	3,0 ± 0,5	620

єнтованому зростанні кристалітів під час затвердіння (рис. 2, б, в), що позитивно впливає на механічні властивості натопленого металу (табл. 1). Алюміній також протидіє утворенню тріщин, викликаних спільною дією Карбону та Сульфуру. Сіркоусунення Алюмінієм зумовлено летючістю сульфідів Алюмінію в умовах натоплення [2].

Крім того, Алюміній має високу спорідненість до Оксигену. Добавка Алюмінію в розпорошуваний розтоп криці відіграє двояку роль. По-перше, Алюміній, що є енергійним розкиснювачем, знижує загальний вміст Оксигену у криці. По-друге, Алюміній, утворюючи під час розпорошення на поверхні крапель тонку плівку Al_2O_3 , запобігає утворенню товстих плівок з оксидів Хрому, Вольфраму, Молібдену, силікатів і шпінелей.

Дослідженнями впливу модифікування Бором показало, що Бор діє на структуру натопленого металу 10P6M5 приблизно аналогічно Алюмінію (рис. 2, г, д). Воднораз, оскільки розчинність Бору у фериті мала, то дуже швидко досягається межа насити α -фази Бором, і, відповідно до діаграми стану Fe–B, в металі утворюється борид Fe_2B [6]. Утворення бориду супроводжується збільшенням питомого об'єму на $\cong 15$ –17%, що викликає значні внутрішні напруження. Внаслідок цього, а також через високу твердість і крихкість Fe_2B міцність за згинання й ударна в'язкість натопленого металу зменшуються (табл. 1).

Результати дослідження червоностійкості криць, модифікованих Алюмінієм або Бором, представлено на рис. 3. Модифікація натопленого металу цими елементами привела до підвищення червоностійкості криці 10P6M5 до 690°C.

Випробування різальних властивостей натопленого металу про-

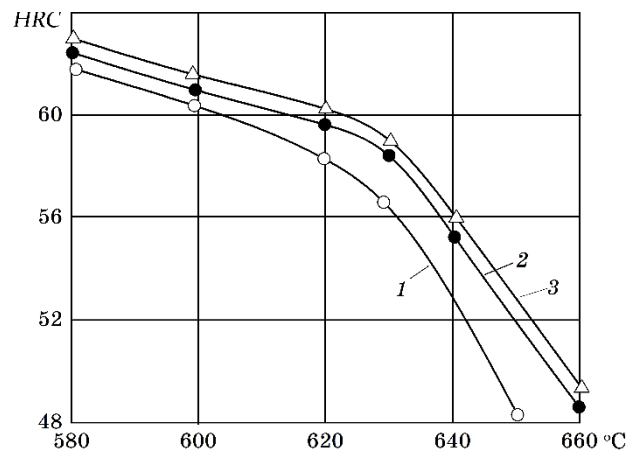


Рис. 3. Червоностійкість немодифікованого (1) та модифікованого 0,05% Алюмінію (2) або 0,06% Бору (3) натопленого металу типу криці 10Р6М5.

Fig. 3. Red-hardness of unmodified (1) and modified with 0.05% aluminium (2) or 0.06% boron (3) deposited metal of steel type 10R6M5.

водилися на різцях і фрезах. З натоплених валиків швидкорізальної криці вирізали пластинки розмірами $6 \times 15 \times 15$ мм для різців і $5 \times 13 \times 13$ мм для фрез з припусками на подальше оброблення. Під час точіння в якості оброблюваного матеріалу використовували заготовки з криць 12Х18Н10Т і 30ХГСА, а під час фрезерування — з криці 45. Випробовувалися два типи пластинок з натоплених криць типу 10Р6М5, модифікованих 0,05% Алюмінію або 0,06% Бору. Для порівняння випробовували пластинки з кованої криці Р6М5 і натопленого металу типу криці 10Р6М5.

З графіків видно (рис. 4), що в діапазоні швидкостей різання 15–20 м/хв стійкість різців з кованої криці Р6М5 і пластинками з натопленої немодифікованої криці 10Р6М5 по суті однакова. З підвищенням швидкості різання понад 20 м/хв стійкість різців з пластинками із натопленого металу 10Р6М5, модифікованого Бором у кількості 0,06%, перевищує стійкість різців із кованої криці Р6М5 і натопленої немодифікованої криці 10Р6М5 в 1,3–1,4 рази. У разі використання як модифікатора Алюмінію стійкість натопленого металу під час точіння збільшується в 1,2 рази.

Були досліджені різальні властивості пластинок з натопленої швидкорізальної криці під час торцевого фрезерування без охолоджувальної рідини заготовок із криці 45 з вихідними розмірами оброблюваної поверхні у 120×120 мм. За еталон було взято пластинки з немодифікованої криці 10Р6М5. Дослідженнями встановлено, що модифікування Алюмінієм або Бором натопленого металу 10Р6М5 збільшило стійкість інструментів під час фрезерування на

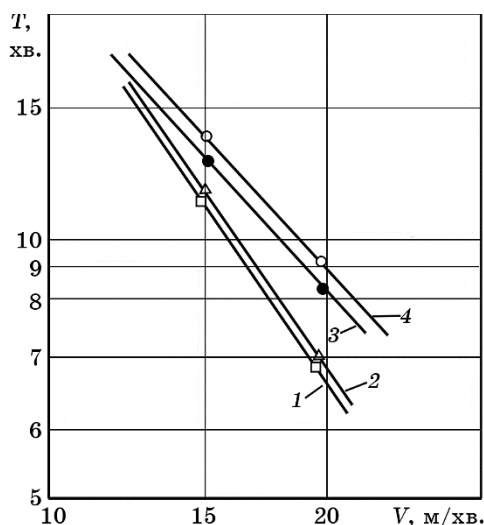


Рис. 4. Стійкість різців T з пластинками з кованої криці Р6М5 (1), з немодифікованого (2) та модифікованого Алюмінієм 0,05 % (3) і Бором 0,06% (4) нагрітого металу типу криці 10Р6М5 в залежності від швидкості точіння V під час оброблення криці 12Х18Н10Т.

Fig. 4. Tool life of turning tools, T , with plates made of forged steel R6M5 (1), from unmodified (2) and modified with aluminium 0.05% (3) or boron 0.06% (4) deposited metal type steel 10R6M5 depending on the speed turning V during the processing of steel 12X18H10T.

5–10% і 15–20% відповідно (табл. 2).

Збільшення стійкості модифікованого Алюмінієм або Бором нагрітого металу типу криці 10Р6М5 під час різання та фрезерування зумовлено поєднанням дрібнозернистої структури з відносно

ТАБЛИЦЯ 2. Відносна зносостійкість пластинок з нагрітих швидкорізальних криць під час фрезерування.

TABLE 2. Relative wear resistance of plates from deposited high-speed steels during milling.

Швидкість різання, м/хв	Тривалість різання, хв.	Відносна зносостійкість криці		
		10Р6М5 без модифікаторів	10Р6М5 з 0,05% Al	10Р6М5 з 0,06% В
80	18	100	91	80
60	22	100	95	85
40	48	100	90	79

тонкою карбідною сіткою та високою червоностійкістю.

4. ВИСНОВКИ

1. Модифікування натопленого металу 10P6M5 Алюмінієм у кількості 0,01–0,05% сприяє утворенню додаткових центрів кристалізації та пригніченню зростання стовпчастих кристалітів. В результаті підвищується червоностійкість натопленої швидкорізальної криці, а міцність за згинання й ударна в'язкість зберігаються на рівні кованої швидкорізальної криці.

2. Дослідженнями встановлено, що модифікування Бором у кількості 0,015–0,060% діє на структуру натопленого металу 10P6M5 приблизно аналогічно Алюмінію. Однак утворення водночас бориду Fe_2B , яке супроводжується збільшенням питомого об'єму на $\cong 15$ –17%, приводить до появи значних внутрішніх напружень і зменшує міцність за згинання й ударну в'язкість натопленого металу 10P6M5, модифікованого Бором.

3. Збільшення стійкості різальних інструментів, виготовлених з використанням пластинок з натопленого металу 10P6M5, модифікованого Алюмінієм або Бором, зумовлено поєднанням дрібнозернистої структури натопленого металу з відносно тонкою карбідною сіткою та високою червоностійкістю.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. И. И. Фрумин, *Автоматическая электродуговая наплавка* (Харьков: Металлургиздат: 1961).
2. П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев, *Плазменная наплавка* (Киев: Экотехнология: 2007).
3. Н. А. Горпенюк, *Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в машиностроении и ремонте* (Киев: ИЭС им. Е. О. Патона: 1981), с. 29.
4. Ю. В. Клименко, *Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в машиностроении и ремонте* (Киев: ИЭС им. Е. О. Патона: 1981), с. 33.
5. И. А. Бартнев, *Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка в машиностроении и ремонте* (Киев: ИЭС им. Е. О. Патона: 1981), с. 21.
6. Я. Е. Гольдштейн, В. Г. Мизин, *Модифицирование и микролегирование чугуна и стали* (Москва: Металлургия: 1986).

REFERENCES

1. I. I. Frumin, *Avtomaticheskaya Ehlektrodugovaya Naplavka* [Automatic Electric Arc Surfacing] (Khar'kov: Metallurgizdat: 1961) (in Russian).

2. P. V. Gladkiy, Ye. F. Perepletchikov, and I. A. Ryabtsev, *Plazmennaya Naplavka* [Plasma Surfacing] (Kiev: Ehkotekhnologiya: 2007) (in Russian).
3. N. A. Gorpenyuk, *Teoreticheskie i Tekhnologicheskie Osnovy Naplavki. Naplavka v Mashinostroenii i Remonte* [Theoretical and Technological Foundations of Surfacing. Surfacing in Mechanical Engineering and Repair] (Kiev: IEhS im. E. O. Patona: 1981), p. 29 (in Russian).
4. Yu. V. Klimenko, *Teoreticheskie i Tekhnologicheskie Osnovy Naplavki. Naplavka v Mashinostroenii i Remonte* [Theoretical and Technological Foundations of Surfacing. Surfacing in Mechanical Engineering and Repair] (Kiev: IEhS im. E. O. Patona: 1981), p. 33 (in Russian).
5. I. A. Bartenev, *Teoreticheskie i Tekhnologicheskie Osnovy Naplavki. Naplavka v Mashinostroenii i Remonte* [Theoretical and Technological Foundations of Surfacing. Surfacing in Mechanical Engineering and Repair] (Kiev: IEhS im. E. O. Patona: 1981), p. 21 (in Russian).
6. Ya. E. Goldstein and V. G. Mizin, *Modifitsirovanie i Mikrolegirovanie Chuguna i Stali* [Inoculation and Microalloying of Cast Iron and Steel] (Moskva: Metallurgiya: 1986) (in Russian).