

УДК 621.762

І. Ю. ТРОСНІКОВА

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна*

### ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ МОЛІБДЕНОМ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕВТЕКТИЧНОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ WC-W<sub>2</sub>C

*Досліджено вплив легування молібденом на фізико-механічні властивості евтектичного сплаву системи WC-W<sub>2</sub>C, отриманого відцентровим розпиленням електроду, що обертається. Показано, що в порівнянні з нелегованим релітом мікротвердість реліту, легovanого молібденом (5 % (мас.)), підвищується більш ніж на 30%, міцність в 2 рази, а зносостійкість сферичних частинок у 2-3 рази, що задовільно узгоджується зі зміною напружено-деформованого стану фазових складових композиційного матеріалу і пояснюється механізмом зернограничного та деформаційного зміцнення.*

**Ключові слова:** реліт, розпилення, легування, зносостійкість, твердість, фізико-механічні властивості

**Вступ.** Прихід на вітчизняний ринок бурових послуг іноземних компаній привів до зміни бурових технологій і техніки та суттєво змінив вимоги, що пред'являються до матеріалу і конструкцій бурильних труб. Найбільш затребуваними на сьогодні є високоміцні бурильні труби, які займають більше 70% ринку. Екстремальні умови експлуатації бурильних труб призводять до їх руйнування. Основними причинами руйнування бурильних труб є тріщини, що утворилися в умовах великих навантажень та корозійного і абразивного зносу. З огляду на те, що сучасні високоміцні бурильні труби мають високу вартість, втрати від браку складають десятки мільйонів. Оцінюючи статистичні дані, можна зробити висновок, що понад 60% труб відбраковуються через зношування зовнішнього діаметра замку, при цьому інші параметри труби відповідають допустимим нормам.

Таким чином, одним з пріоритетних напрямків при виробництві та капітальному ремонті бурильних труб являється зміцнююча наплавка зносостійкими матеріалами зовнішньої поверхні замків.

Карбіди вольфраму, які застосовуються у вигляді сферичних порошків різної зернистості або ж у вигляді частинок порошку неправильної форми, представляють собою евтектичний сплав системи WC-W<sub>2</sub>C (сплав реліту – 78–80% (мас.) W<sub>2</sub>C, 20–22% (мас.) WC), що володіють високими значеннями твердості та зносостійкості [1].

**Постановка завдання.** Оскільки серед вивчених добавок різної природи та хімічного складу [2] добавка молібдену забезпечує найменшу величину пористості матеріалу частинок порошку, метою роботи було встановлення впливу концентрації молібдену (у кількості 3, 5, 7, 10, 20 % (мас.) на фізико-механічні властивості евтектичного сплаву системи WC-W<sub>2</sub>C (реліту).

Відомо [3], що найбільш високі значення твердості і міцності досягаються на матеріалах, які представляють собою матрицю із однієї тугоплавкої сполуки, армовану монокристалічними волокнами іншої тугоплавкої сполуки.

Сплав реліту, легований молібденом, має комірчасту структуру з хаотично розташованими по об'єму матеріалу зернами шестигранної форми, на границях яких утворюється складний карбід (Mo, W)<sub>2</sub>C [4].

Встановлено, що легування реліту молібденом в кількості 5 % (мас.) підвищує зносостійкість на 40-50 %. При цьому, легування молібденом в кількості 10-20 % (мас.) знижує зносостійкість [5].

На твердість та міцність матеріалів може впливати багато факторів, таких як форма та розмір включень, їх розташування в матриці та механічні напруження, що виникають у фазових складових. Так як утворення відбитків мікротвердості обумовлено пружньо-пластичною мікродеформацією, тому значення мікротвердості пропорційне межі текучості  $H=3\sigma_y$ .

При низьких температурах рівень міцності визначається пружними характеристиками, розміром зерна, наявністю границь зерен, мікропор та ін. дефектів, що являються концентраторами напружень та ділянками скупчення дислокацій, об'єднання яких призводить до зародження тріщин. Руйнування має характер сколу і, в основному, проходить по границям зерен.

Напруження призводять до зсуву інтерференційних ліній, який найбільше проявляється на відбитках під великими брегівськими кутами. На рентгенограмах « $\theta$ - $2\theta$ » сплаву WC-W<sub>2</sub>C, легованого молібденом, спостерігається зсув рефлексів. Напруження в фазі W<sub>2</sub>C, отримані за рефlekсами в діапазоні кутів  $2\theta$  65-145° – від'ємні, тобто стискаючі, і складають при вмісті молібдену 5 % (мас.) – 1,2 ГПа, 10 % (мас.) – 4 ГПа, 20 % (мас.) – 5,5 ГПа.

Напруження у фазах включень також отримані по значній кількості відбитків в діапазоні кутів  $2\theta$  65-125° при вмісті молібдену від 5 до 20 % (мас.) мають протилежний знак, тобто є розтягуючими [4]. Збільшення вмісту молібдену у сплавах реліту призводить до збільшення напружень стиснення в матричній фазі W<sub>2</sub>C та напружень розтягування у включеннях WC, Mo<sub>2</sub>C, (W,Mo)<sub>2</sub>C.

Руйнування сплавів відбувається в більшій мірі під дією розтягуючих напружень. Стискаючі напруження знижують чутливість матеріалу до концентраторів напружень і підвищують втону міцність матеріалу. Абсолютні значення зсуву дифракційних відбитків призводять до значень напружень приблизно однакових по різних лініях, незважаючи на можливі відхилення модулів пружності для цих відбитків. Зсув дифракційних відбитків може бути пов'язаний, крім напружень, із утворенням дефектів кристалічної структури першого типу згідно [5], в яких напруження швидко спадають із відстанню від дефектів. До цих дефектів відносяться точкові дефекти (пори, атоми втілення та ін.).

Відомо, що твердість карбідів залежить в основному від двох факторів – пластичної деформації внаслідок неоднорідностей атомного масштабу і міцності хімічного зв'язку. Під неоднорідністю атомного масштабу розуміється розміщення в карбідах між суміжними атомними площинами менш проникних атомів вуглецю, які ускладнюють утворення площин зсуву. Роль «заклинювання» площин (за рахунок утворення зв'язків між атомами металу і вуглецю) особливо велика у випадку карбідів з гексагональною структурою, де наявна всього одна площина зсуву [6].

У роботі встановлено, що зі збільшенням вмісту молібдену в сплаві знижується мікротвердість. Це пояснюється тим, що в сплавах, легуваних меншою кількістю молібдену спостерігається більший вміст карбідної фази.

Експериментально виявлено, що мікротвердість реліту зі збільшенням розміру частинок зменшується, що можна пояснити формуванням більш однорідної дрібнокристалічної структури, яка обумовлена високою швидкістю охолодження.

Встановлено, що найвищі показники мікротвердості мають сплави з вмістом молібдену 5-7 мас.% (рис.1).

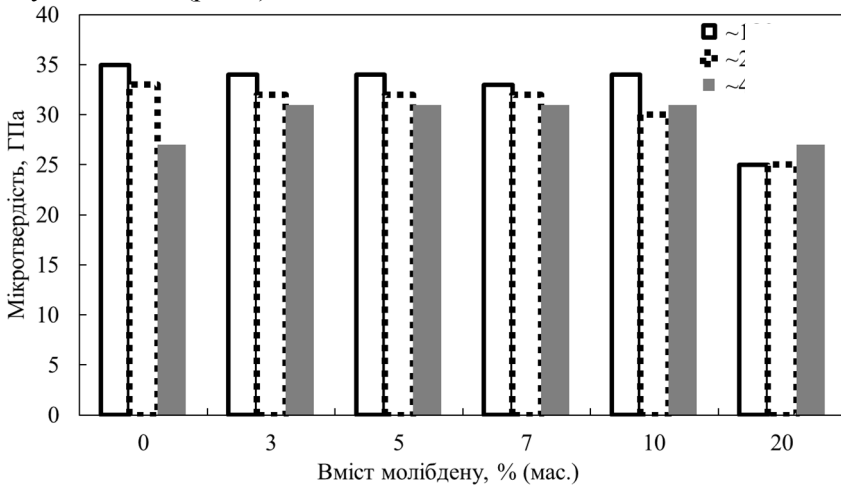


Рис. 1. Вплив вмісту молібдену та гранулометричного складу на мікротвердість сплавів:  
 □ ~ 180 мкм; ▤ ~ 250 мкм; ■ ~ 450 мкм

В результаті порівняльних випробувань встановлено, що зносостійкість частинок реліту, що мають більший вміст молібдену перевищує зносостійкість частинок, що мають менший вміст молібдену – в 3 і більше разів. Зносостійкість сферичних частинок визначалась за втратою маси в залежності від шляху тертя (рис. 2).

Дослідженнями також встановлено, що у початковий період випробувань спостерігається припрацювання сплавів, початкове зношення поверхонь сфер. При цьому, припрацювання сферичних частинок відбувається в період шляху тертя по абразиву до 1000 м. Характерною рисою процесу зношування композиційних сплавів є стабілізація зношування сплавів після притирання.

Встановлено, що легування молібденом в кількості 5 – 7 % (мас.) реліту підвищує зносостійкість сферичних частинок, одержаних відцентровим розпиленням (рис. 2).

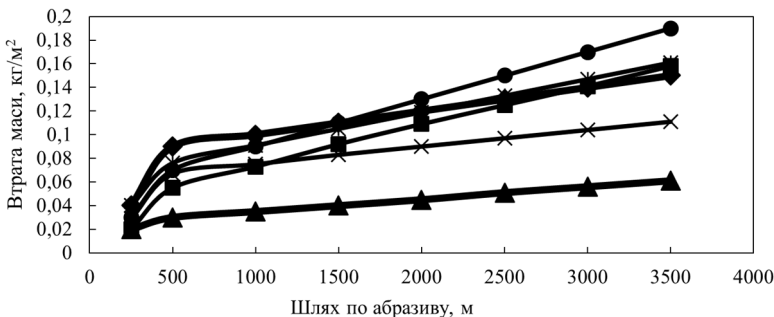


Рис. 2. Зносостійкість сферичних частинок легованого та нелегованого реліту:  
 ● – WC+W<sub>2</sub>C; ■ – 3% Mo; ▲ – 5% Mo; × – 7% Mo; \* – 10% Mo

При цьому легування молібденом в кількості 10 – 20 % (мас.) знижує зносостійкість сферичних частинок. Цей ефект можна пояснити міцністю частинок легованого реліту з більшим вмістом молібдену, в яких зношення, руйнування і викришування гострих кутів частинок відбувається за більш довгий період припрацювання.

Встановлено, що одним з основних параметрів процесу, на який впливає легування реліту молібденом, являється швидкість подачі вилівка в зону плавлення. Тому експериментально встановлена залежність швидкості подачі вилівка від вмісту молібдену в реліті (рис.3).

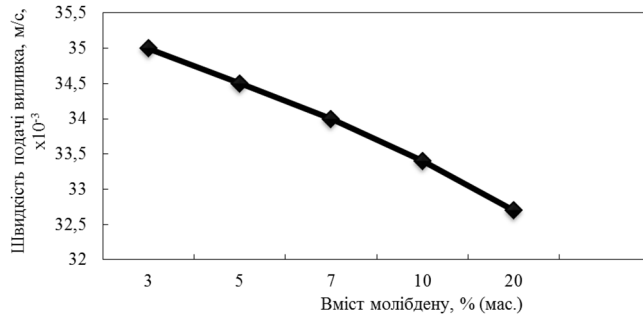


Рис. 3. Вплив легування реліту молібденом на швидкість подачі вилівка при відцентровому розпиленні

Викликає інтерес закономірність зниження швидкості подачі вилівка при зростанні вмісту молібдену, що можна пояснити утворенням складної карбідної фази  $(W, Mo)_2C$ , яка має більш високу температуру плавлення, за рахунок чого і спостерігається деяке зменшення швидкості плавлення вилівку. Таким чином, встановлені основні оптимальні параметри процесу розпилення: сила струму плазмової дуги – 550-590 А, напруга – 38-40 В, швидкість обертання вилівка – 7500 об/хв., швидкість подачі вилівка –  $34-34,5 \times 10^{-3}$  м/с.

Дотримання вказаних параметрів дозволяє отримувати максимальну кількість сферичних частинок реліту, легованого молібденом, розміром менше 180 мкм (рис. 4).

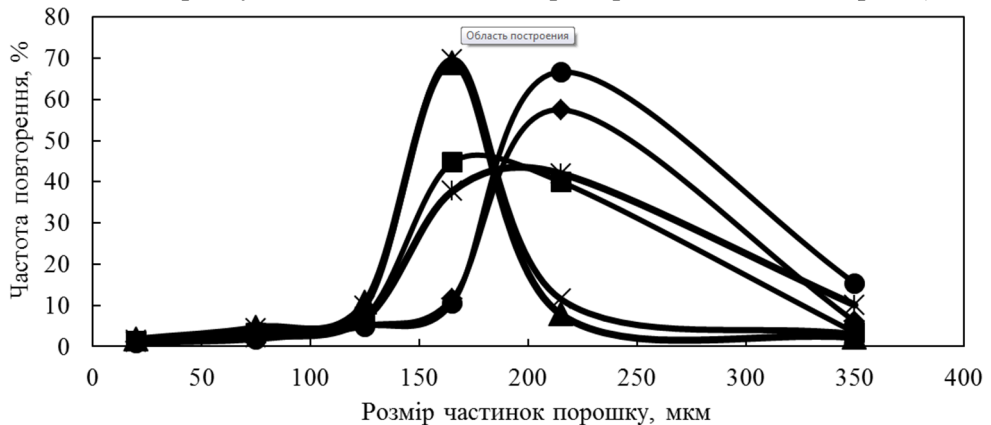


Рис. 4. Вплив легування реліту молібденом на гранулометричний склад сферичних частинок при відцентровому розпиленні:  $\blacklozenge$  – WC+W<sub>2</sub>C;  $\blacksquare$  – 3% Mo;  $\blacktriangle$  – 5% Mo;  $\times$  – 7% Mo;  $\ast$  – 10% Mo;  $\bullet$  – 20% Mo

Аналіз гранулометричного складу сферичних частинок показує, що зі збільшенням вмісту молібдену, крім зниження швидкості подачі вилівка, спостерігається ріст кількості частинок більшого розміру.

Таким чином, оптимальним вмістом молібдену при легуванні реліту являється вміст 5-7%. Вказаний висновок також підтверджується аналізом кількості відходів (рис. 5).

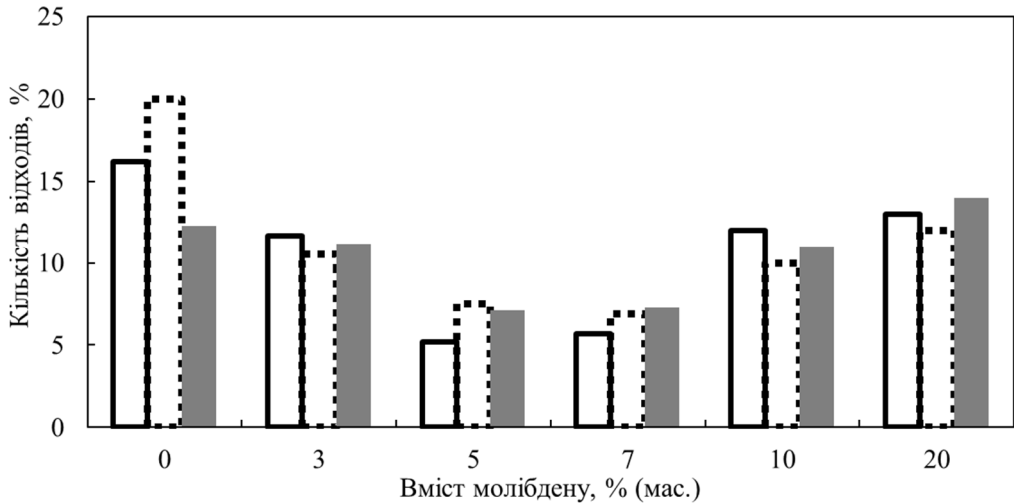


Рис. 5. Вплив легування реліту молібденом на кількість відходів при відцентровому розпиленні: □ ~ 180 мкм; ▨ ~ 250 мкм; ■ ~ 450 мкм

**Висновки.** У роботі встановлено, що легування реліту молібденом дозволяє підвищити механічні характеристики у в 1,2 – 1,5 рази.

Показано, що збільшення вмісту молібдену від 5 до 20 % (мас.) у сплавах реліту призводить до збільшення напружень стиснення в матричній фазі  $W_2C$  та напружень розтягування включень  $WC$ ,  $Mo_2C$ ,  $(W,Mo)_2C$ , що в свою чергу призводить до зменшення твердості на 30%.

Встановлено, що найвищі показники фізико-механічних властивостей мають сплави на основі карбідів вольфраму із вмістом молібдену 5 % (мас.).

Показано, що легування молібденом в кількості 5 % (мас.) підвищує зносостійкість сферичних частинок у 2-3 рази, що задовільно узгоджується зі зміною напружено-деформованого стану фазових складових композиційного матеріалу і пояснюється механізмом зернограничного та деформаційного зміцнення.

#### Список літератури

1. Волкогон В. М. Получение, структура и свойства распыленных порошков сплавов карбидов вольфрама  $WC+W_2C$  / В. М. Волкогон, С. К. Аврамчук, Д. А. Котляр // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. трудов. – 2010. – № 13. – С. 414 – 419.
2. Лобода П. І. Вплив легування на структуру та властивості сплавів системи  $WC-W_2C$  / П. І. Лобода, І. Ю. Троснікова, О. І. Білий, О. П. Карасєвська // Металознавство та обробка металів. – 2012. – № 2. – С. 62 – 67.
3. Лобода П. І. Фізико-хімічні основи створення нових боридних матеріалів для електронної техніки і розробка керамічних катодних вузлів з підвищеною ефективністю // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. – 2004. – 46 с.
4. Троснікова І. Ю. Вплив легування молібденом на мікроструктуру та властивості сплавів системи  $WC-W_2C$  / І. Ю. Троснікова, П. І. Лобода, О. І. Білий // Порошкова металургія. – 2014. – № 3/4. – С. 121 – 127.
5. Кривоглаз М. А. Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах. – К.: «Наукова думка», 1983. – 407 с.
6. Курлов А. С. Структура и свойства карбидов вольфрама различной дисперсности // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Екатеринбург: Институт химии твердого тела. УО РАН. – 2007. – 25 с.

Стаття надійшла до редакції 26.09.2018.

I. YU. TROSNIKOVA

## THE INFLUENCE OF DOPING MOLYBDENUM ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE EUTECTIC ALLOY OF SYSTEM OF WC-W<sub>2</sub>C

The arrival on the market of drilling services of foreign companies has led to a change in drilling technology and substantially changed the requirements for the material and structures of drill pipes. The most demanded today are high-strength drill pipes, which occupy more than 70% of the market. The extreme conditions of operation of drill pipes lead to their destruction.

The main causes of the destruction of drill pipes are cracks. They form in conditions of high loads and corrosion and abrasive wear. Assessing the statistical data, we can conclude that more than 60% of pipes are defected due to the wear of the outer diameter of the castle, while other parameters of the pipe correspond to acceptable standards.

Thus, one of the priority directions in the production and overhaul of drill pipes is the surfacing with wear-resistant materials of the outer surface of the locks.

The highest values of hardness and strength are achieved on materials that represent a matrix of one refractory compound reinforced with monocrystalline fibers of another refractory compound. The spherical and irregularly shaped powder particles of tungsten carbides are used for surfacing on a drilling tools.

The eutectic alloy of the WC-W<sub>2</sub>C system is relit (78-80 wt. % of W<sub>2</sub>C, 20-22 wt. % of WC), which have high hardness and wear resistance.

It was studied the influence of doping with molybdenum on the physical and mechanical properties of the eutectic alloy of the system WC-W<sub>2</sub>C obtained by centrifugal sputtering of the rotating electrode.

It is shown that in comparison with the undoped relit, the microhardness of doped with molybdenum (5 wt. %), increases by more than 30%, durability is 2 times, and the wear resistance of spherical particles 2-3 times, which satisfactorily agrees with the change of the stress-deformed state of the phase components of composite material and is explained by the mechanism of grain boundary strengthening and deformation strengthening.

**Key words:** relit, sputtering, doping, durability, hardness, physical and mechanical properties

### References

1. Volkogon V. M. Poluchenie, struktura i svoystva raspilyennykh poroshkov splavov karbidov volframa WC W<sub>2</sub>C / V. M. Volkogon, S. K. Avramchuk, D. A. Kotlyar // Porodorazrushayushiy i metalloobrabatyivayushiy instrument – tehnika i tehnologiya ego izgotovleniya i primeneniya: Sb. nauch. trudov. – 2010. – № 13. – S. 414 – 419.

2. Loboda P. I. Vplyv lehuвання na strukturu ta vlastyvoli splaviv systemy WC-W<sub>2</sub>C / P. I. Loboda, I. Yu. Trosnikova, O. I. Bilyi, O. P. Karasievska // Metaloznavstvo ta obrobka metaliv. – 2012. – № 2. – S. 62 – 67.

3. Loboda P. I. Fizyko-khimichni osnovy stvorennia novykh borydnykh materialiv dlia elektronnoi tekhniki i rozrobka keramichnykh katodnykh vuzliv z pidvyshchenoiu efektyvnistiu // Avtoreferat dysertatsii na zdobuttia naukovooho stupenia doktora tekhnichnykh nauk. – 2004. – 46 s.

4. Trosnikova I. Yu. Vplyv lehuвання molibdenom na mikrostrukturu ta vlastyvoli splaviv systemy WC-W<sub>2</sub>C / I. Yu. Trosnikova, P. I. Loboda, O. I. Bilyi // Poroshkova metalurhiia. – 2014. – № 3/4. – S. 121 – 127.

5. Krivoglaz M. A. Difraktsiya rentgenovskikh luchey i neytronov v neidealnykh kristallakh. – K.: «Naukova dumka», 1983. – 407 s.

6. Kurlov A. S. Struktura i svoystva karbidov volframa razlichnoy dispersnosti // Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk. – Ekaterinburg: Institut himii tverdogo tela. UO RAN. – 2007. – 25 s.

**Троснікова Ірина Юрїївна** – канд. техн. наук, старший викладач кафедри високо-температурних матеріалів та порошкової металургії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», [itrosnikova@gmail.com](mailto:itrosnikova@gmail.com)