

4. Актуальними є подальші дослідження, спрямовані на розроблення шаруватих бронепластин на основі титану та алюмінію, в яких будуть чергуватися високотверді шари інтерметаліду алюмініду титану з м'якими шарами з алюмінію.

#### Список використаних джерел

1. *Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования* / В. А. Григорян, И. Ф. Кобылкин, В. М. Маринин, Е. Н. Чистяков. – М. : РадиоСофт, 2008. – 406 с.
2. *Швайков Д. К.* Сравнительные баллистические характеристики защитных пакетов из некоторых видов высокопрочных химических волокон / Д. К. Швайков, В. В. Чивилев, В. В. Прошкин // Вопросы оборонной техники. – 1996. – Сер. 15, вып. 3 (115)–4 (116). – С. 10–12.
3. *Кобылкин И. Ф.* Материалы и структуры легкой бронезащиты : учебник / И. Ф. Кобылкин, В. В. Селиванов ; под ред. И. Ф. Кобылкина. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 191 с.
4. *Петрова Э. Н.* Особенности взаимодействия средств поражения с броней СИБ / Э. Н. Петрова, Б. Д. Чухин // ВОТ. – 2003. – Сер. 16, вып. 3–4.
5. *Концептуальные основы создания СИБ* / В. И. Байдак [и др.]. – М., 2003. – 395 с.
6. *Каннель Г. И.* Прочность титана ВТ6 в условиях ударно-волнового нагружения / Г. И. Каннель, Э. Н. Петрова // Материалы II Всесоюзного совещания по детонации. – 1981.
7. *Исследование возможности путей создания перспективных материалов для СИБ бойца* / В. А. Григорян, Э. Н. Петрова, В. А. Хромушин, В. П. Яньков // ВОТ. – 2003. – Сер. 16, вып. 3–4.
8. *Мондольфо Л. Ф.* Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л. Ф. Мондольфо. – М. : Металлургия, 1979. – 639 с.
9. *Проникание и пробивание твердых тел.* USA Ballistic Research Laboratory : пер. с англ. / Дж. А. Зукас, Т. Николас, Х. Ф. Свифт и др. ; под ред. С. С. Григоряна // Динамика удара. – М. : Мир, 1985.
10. *Аномалии деформационных характеристик интерметаллида TiAl* / Б. А. Гринберг, О. В. Антонова, В. Н. Индендаум и др. // Физика металлов и металловедение. – 1992. – № 4. – С. 24–32.
11. *Рабкин Д. М.* Сварка разнородных металлов / Д. М. Рабкин, В. Р. Рябов, С. М. Гуревич. – К. : Техника, 1976. – 208 с.

УДК 691.791.4

**Т.Р. Гансєв**, канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### ОСОБЛИВОСТІ ДИФУЗІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МІДІ ТА МОЛІБДЕНУ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ

**Т.Р. Гансєв**, канд. техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

### ОСОБЕННОСТИ ДИФУЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕДИ И МОЛИБДЕНА ПРИ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ

**Timur Hanieiev**, PhD in Technical Sciences

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

### FEATURES OF DIFFUSION INTERACTION OF COPPER AND MOLYBDENUM DURING THE PRESSURE WELDING

*Досліджено процес дифузійного зварювання у вакуумі міді з молибденом через модифіковані іонним обробленням прошарки. За допомогою методу радіоактивних ізотопів визначені особливості дифузійної взаємодії міді з молибденом. Показано, що змінюючи основні параметри режиму іонного оброблення поверхневого шару зварного матеріалу, можна суттєво впливати на розміри зони взаємодії та механічні властивості зварного з'єднання. Встановлено доцільність під час дифузійного зварювання у вакуумі міді з молибденом попередньої модифікації поверхні молибдену міддю.*

**Ключові слова:** дифузійні процеси, дифузійне зварювання у вакуумі, мідь, молибден.

*Исследован процесс диффузионной сварки в вакууме меди с молибденом через модифицированные ионной обработкой слои. С помощью метода радиоактивных изотопов определены особенности диффузионного взаимодействия.*

вия меди с молибденом. Показано, что изменяя основные параметры режима ионной обработки поверхностного слоя свариваемого материала, можно существенно влиять на размеры зоны взаимодействия и механические свойства сварного соединения. Установлена целесообразность при диффузионной сварке в вакууме меди с молибденом предварительной модификации поверхности молибдена медью.

**Ключевые слова:** диффузные процессы, диффузионная сварка в вакууме, медь, молибден.

The process of diffusion welding in vacuum of copper and molybdenum processing through modified ion layers. With the help of radioactive isotopes by diffusion interaction features of copper and molybdenum. It is shown that changing the basic settings for the treatment of ionic surface layer of weld material can significantly affect the size of the zone of interaction and mechanical properties of the weld. Established in feasibility vacuum diffusion welding of copper and molybdenum previous surface modification molybdenum copper.

**Key words:** diffusion processes, diffusion welding in vacuum, copper, molybdenum.

**Вступ.** Тонкі прошарки (ультрадисперсні порошки, що наносяться різними способами, товщиною до 1 мкм) металів (мідь, нікель, кобальт і т. ін., а також їх суміші) з ультрадисперсною структурою застосовують як проміжні прошарки під час дифузійного зварювання різнорідних матеріалів [1–3]. Крім того, до переваг подібних прошарків відноситься й обставина, що їх наявність у стику приводить до суттєвої інтенсифікації процесу утворення з'єднань і забезпечує механічну та термічну активацію поверхонь у разі зварювання. Їх вплив також приводить до високої дифузійної активності в зоні контакту [4–6], що є наслідком гранично малих розмірів частинок та високорозвинутої вільної поверхні. Це пов'язано з тим, що коефіцієнт дифузії є структурно-чутливою величиною і його ефективне значення може суттєво перевищувати рівноважне за наявності макроскопічних дефектів і розвинутої системою границь розділу.

**Постановка проблеми.** Цей технологічний спосіб є практично єдиним варіантом у випадку, коли необхідно якісно з'єднати метали, які у твердому стані важко зварюються.

Саме це відноситься до пари молибден-мідь, поєднання яких використовується під час виготовлення різноманітних виробів у електротехнічній промисловості. Особливістю цієї дифузійної пари є відсутність розчинності Мо в Cu [7; 8]. Ця обставина перешкоджає отриманню якісного з'єднання цих металів методом дифузійного зварювання.

**Мета роботи.** У цій роботі наведені результати досліджень процесів перерозподілу атомів та швидкостей дифузії під час дифузійного зварювання молибдену з міддю через модифіковані іонним обробленням прошарки.

**Виклад основного матеріалу.** На поверхню молибдену іонно-плазмовим методом наносили шар міді товщиною до 1 мкм. Потім усі зразки Мо з шаром міді, за винятком базового, підлягали обробленню іонами аргону для створення зони атомної взаємодії Мо з Cu з метою підвищення адгезії. Далі зразки підлягали дифузійному зварюванню. Режими підготовки і дифузійного зварювання зразків представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Режими підготовки і дифузійного зварювання зразків

№ зразка	№ режиму	$T_{зв}, ^\circ C$	$T_{зв}, хв$	$\tau_{обр.}^{Ar}, хв$	$U_{приск.}, В$	$P, кгс/мм^2$	Товщина шару Cu, мкм
1	2	3	4	5	6	7	8
1	I	950	20	0	0	1,5	1
2	II	950	20	10	1200	1,5	1
3	III	950	20	20	1200	1,5	1
4	IV	950	20	20	2000	1,5	1

Номер 1(I) у цьому випадку є базовим. Інші режими відрізняються від базового й один від одного тривалістю оброблення аргонем ( $\tau_{обр.}^{Ar}$ ) та прискорюючою напругою ( $U_{приск.}$ ) такого оброблення.

Дифузійні процеси в зоні контакту під час зварювання зразків вивчали методом радіоактивних ізотопів. У роботі використовували радіоактивний ізотоп нікелю  $^{63}Ni$ , який наносили електролітичним методом на Мо. Товщина шару  $^{63}Ni$  становила  $\sim 0,3$  мкм, активність  $5 \cdot 10^3$  імп/хв. Після зварювання зразки розрізались і розміщувались на рентге-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

нівській плівці. Витримка на плівці становила близько 100 годин. Після проявлення плівку фотометрували та отримували концентраційний розподіл радіоактивного ізотопу нікелю як у Мо, так і в Cu. Оцінювання значень коефіцієнтів дифузії проводили за методикою, що описана в роботі [9].

На рис. 1 представлені концентраційні розподіли радіоактивного ізотопу нікелю в Мо та Cu після дифузійного зварювання відповідно чотирьом режимам.

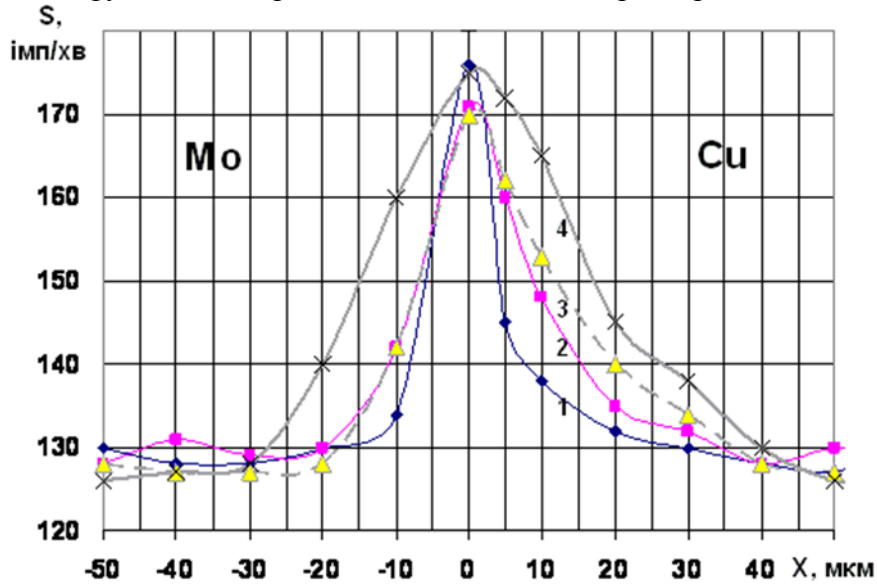


Рис. 1. Концентраційний розподіл <sup>63</sup>Ni в Мо та Cu після зварювання на базовому режимі I та на режимах II, III, IV (табл. 1)

Як показує аналіз представлених кривих у процесі зварювання, <sup>63</sup>Ni проникає на значні глибини (десятки та сотні мкм) як у Мо, так і в Cu.

Слід також зазначити чітко виражену асиметричність кривих, яка полягає в тому, що у всіх випадках глибина проникнення <sup>63</sup>Ni в Cu помітно більша в порівнянні з Мо. Цей результат може бути пов'язаний з тією обставиною, що відповідно до діаграми стану Cu-Ni [10; 11] ці метали на всьому діапазоні концентрацій мають необмежену розчинність (рис. 2).

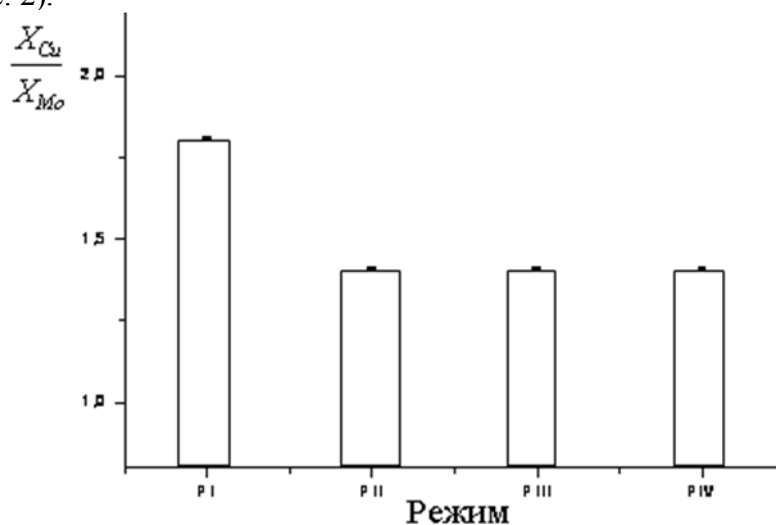


Рис. 2. Зміна відношення глибини проникнення <sup>63</sup>Ni (X) у Cu та Мо залежно від режиму оброблення

Водночас розчинність Ni в Мо та Мо в Ni відповідно до діаграми стану [12–14] суттєво обмежена. Крім того, слід врахувати і велику різницю в температурах плавлення Мо та Cu, 2610 і 1083 °C відповідно [15]. Отже, температура, за якої відбувається дифу-

зійне зварювання (950 °С) була для Cu значно вище в порівнянні з Mo. Таким чином, зведена температура ( $T_{звар}/T_{пл}$ ) для Cu у цьому випадку становить 0,88, а для Mo – 0,37.

Експериментальні дані, отримані в результаті оброблення концентраційних кривих, представлені в табл. 2 та рис. 2–5.

Таблиця 2

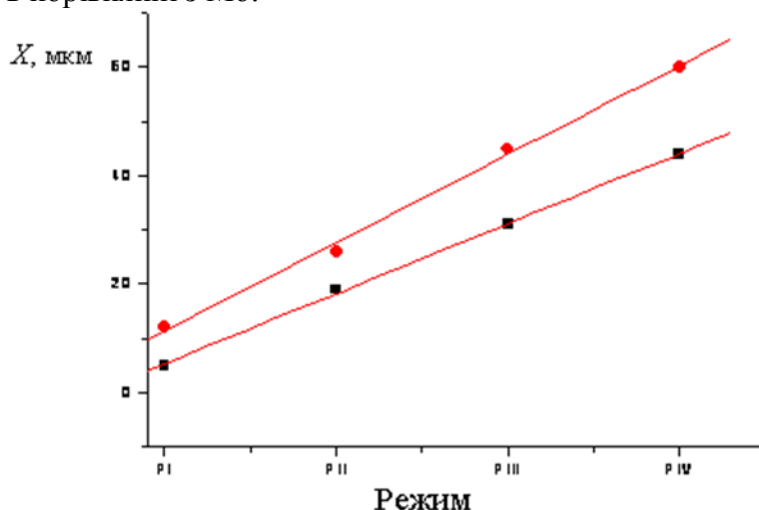
## Результати оброблення концентраційних кривих

№ зразка	X, мкм		$\tau_{обр}^{Ar}$ , хв		T <sub>звар</sub> , хв		U <sub>приск.</sub> , В		$X_{Cu}/X_{Mo}$
	Cu	Mo	Cu	Mo	Cu	Mo	Cu	Mo	
1	11	6	–	0	20	20	0	0	1,8
2	26	19	–	10	20	20	1200	1200	1,4
3	45	33	–	20	20	20	1200	1200	1,4
4	60	44	–	20	20	20	2000	2000	1,4

Як видно з табл. 2, глибина розподілу  $^{63}Ni$  в Cu у всіх випадках більша у порівнянні з Mo. Водночас відношення цих глибин різне (рис. 2).

Такий характер представленої залежності пов'язаний з тим, що максимальне відношення  $X_{Cu}/X_{Mo}$  відноситься до режиму I (базовому). Особливістю цього режиму є відсутність оброблення Mo з нанесеним на нього шару Cu іонами Ag. Очевидно, що оброблення вказаної поверхні Ag приводить до перемішування атомів шарів, які знаходяться на Mo. До них відноситься мідь,  $^{63}Ni$  та Mo. В результаті після цього оброблення частина атомів  $^{63}Ni$  проникає в Mo, утворюючи псевдодифузійний шар. У процесі наступного дифузійного зварювання атоми  $^{63}Ni$  дифундують у Mo з певної визначеної глибини і загальний дифузійний шар стає більшим. У випадку реалізації режиму I ці процеси не відбуваються.

На рис. 3 представлена залежність глибини проникнення  $^{63}Ni$  в Cu і Mo залежно від режиму оброблення. Видно, що при всіх режимах оброблення глибина проникнення  $^{63}Ni$  в Cu вища в порівнянні з Mo.

Рис. 3. Зміна глибини проникнення  $^{63}Ni$  в Cu (●) і Mo (■) залежно від режиму оброблення

На рис. 4 представлена залежність глибини проникнення  $^{63}Ni$  в Mo від тривалості оброблення іонами аргону.

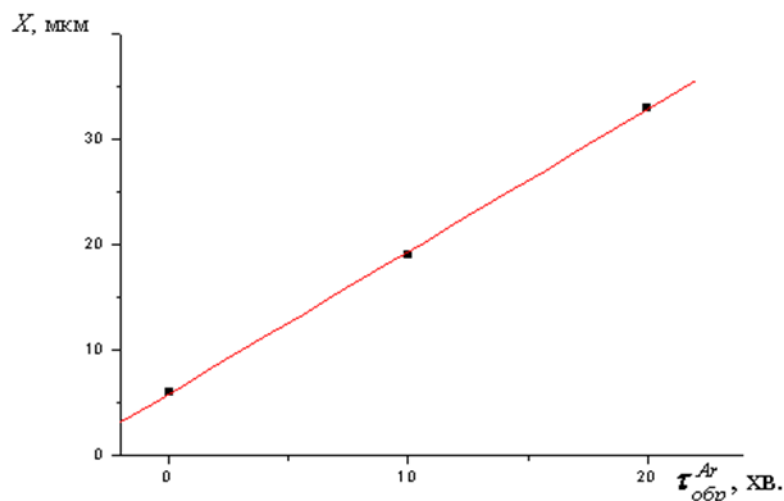


Рис. 4. Залежність глибини проникнення  $^{63}\text{Ni}$  в Мо від часу оброблення іонами Ar

Як видно з рис. 4, вказана залежність має лінійний характер. Збільшення тривалості оброблення Мо з нанесеним на нього шаром міді іонами аргону приводить до суттєвого зростання глибини проникнення в нього  $^{63}\text{Ni}$ , а саме від 6 до 33 мкм. Виходячи з цього факту, можемо зробити висновок, що змінюючи час оброблення Мо іонами аргону, можна суттєво впливати на розміри зони взаємодії міді з молібденом і тим самим керувати величиною адгезії Cu на Мо. Аналогічний висновок можна зробити з даних, представлених на рис. 5.

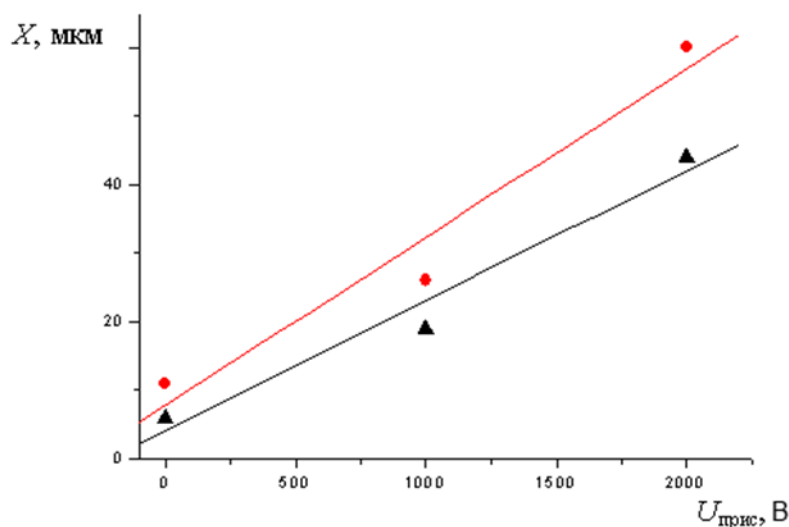


Рис. 5. Залежність глибини проникнення  $^{63}\text{Ni}$  в Cu (●) і Мо (▲) від величини прискорюючої напруги під час оброблення іонами аргону

Як видно з представленого рисунка, глибина проникнення  $^{63}\text{Ni}$  в мідь і молібден суттєво залежить від величини прискорюючої напруги під час оброблення молібдену іонами аргону. Ця залежність має лінійний характер. При цьому слід відзначити, що розміри зони проникнення  $^{63}\text{Ni}$  в мідь значно більше в порівнянні з молібденом.

Важливим параметром, що визначає механічні характеристики зварних з'єднань, є коефіцієнт дифузії. Цей параметр характеризує особливості та закономірності взаємодії матеріалів у багатьох технологічних процесах. А саме він дуже важливий під час хіміко-термічного оброблення, зварювання та ін. У зв'язку з цим у цій роботі проведено дослідження дифузійних характеристик процесу зварювання міді з молібденом з використанням радіоактивного ізоотопу  $^{63}\text{Ni}$ . В табл. 3 представлено результати цього дослідження.

Характеристики дифузійних процесів під час зварювання міді з молібденом

№ зразка	$D_{eff}$ см <sup>2</sup> /с		$D_{eff}^{Cu} / D_{eff}^{Mo}$	$lg(D_{eff})$	
	Cu	Mo		Cu	Mo
1	$5,1 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	3,4	-9,3	-9,8
2	$3,22 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	3,22	-8,6	-9,0
3	$8,44 \cdot 10^{-9}$	$2,26 \cdot 10^{-9}$	3,7	-8,1	-8,7
4	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-9}$	3,5	-7,8	-8,4

З аналізу даних, представлених у табл. 3, видно, що рухливість <sup>63</sup>Ni в міді майже в 3,5 рази вище в порівнянні з молібденом. Як зазначалось вище, це може бути пов'язано з тим, що температура плавлення молібдену та міді відрізняються майже в три рази і розчинність нікелю в міді значно вища.

На рис. 6 представлена залежність логарифмів коефіцієнтів дифузії від режимів оброблення та зварювання. З цього видно, що рухливість нікелю в міді у всіх випадках вища, ніж у молібдені. При цьому чітко видно, що приріст значення коефіцієнтів дифузії зменшується у процесі зміни режиму оброблення.

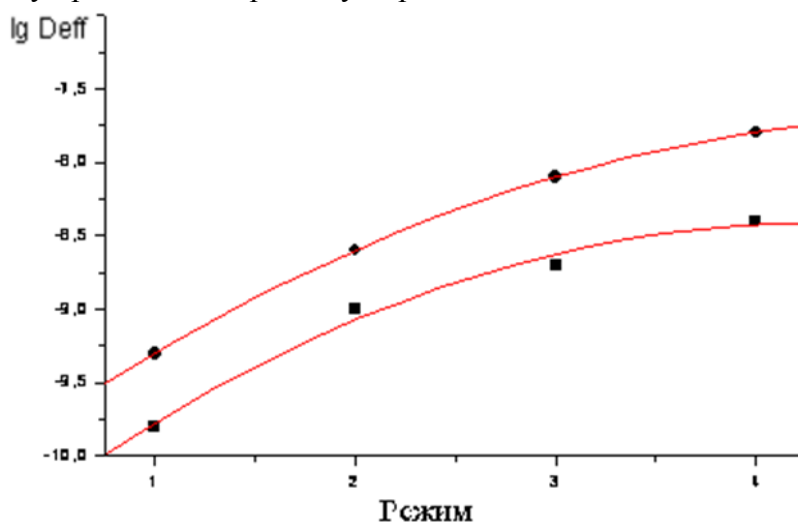


Рис. 6. Залежність логарифма коефіцієнтів дифузії від режиму оброблення ● – Cu, ■ – Mo

Механічні випробування отриманих з'єднань показали, що залежно від режиму зварювання міцність зварного з'єднання також змінюється (рис. 7).

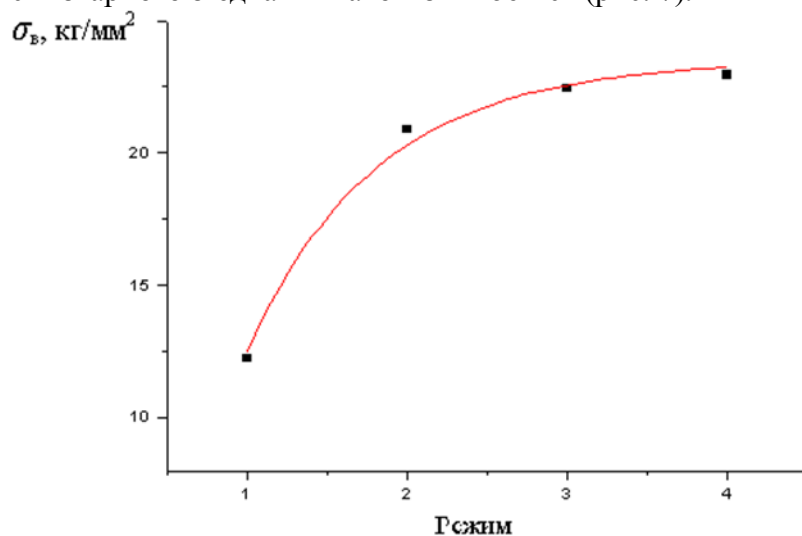


Рис. 7. Залежність міцності зварного з'єднання міді з молібденом від режиму зварювання

Як видно з представленого рисунка, механічні характеристики з'єднань на розрив під час зварювання на режимі 4 досягають міцності основного металу – міді. Такий результат свідчить про можливість використання розглянутого методу активації поверхні під час зварювання різнорідних металів, які суттєво відрізняються за своїми фізико-хімічними та механічними властивостями.

### Висновки

1. Встановлено, що збільшення тривалості оброблення та прискорюючої напруги під час оброблення Мо з нанесеним на нього шаром міді іонами аргону дозволяє суттєво розширити розміри зони взаємодії міді з молібденом. Показано, що іонне оброблення мідного покриття на молібдені може у 4–5 разів розширити зону дифузійної взаємодії під час дифузійного зварювання міді з молібденом у порівнянні зі зварюванням напряму.

2. Виявлено, що іонне оброблення мідного покриття на молібдені дозволяє у 2 рази підвищити міцність зварного з'єднання міді з молібденом у порівнянні зі зварюванням без оброблення.

### Список використаних джерел

1. *Диффузионная сварка магнитных материалов через пористые прослойки из прокатанных лент* / Э. С. Каракозов, В. Г. Панаєтов, В. Э. Тарлавский, А. В. Люшинский // Сварочное производство. – 1984. – № 10. – С. 18–20.
2. *О природе диффузионных процессов, ответственных за образование соединений при сварке в твердой фазе* / Л. Н. Лариков, А. М. Макара, А. Т. Назарчук, В. М. Фальченко // ФиХОМ. – 1971. – № 4. – С. 113–116.
3. *Харченко Г. К.* Плакирование стали титаном через прослойку ванадия / Г. К. Харченко, В. Г. Ткаченко // Цветные металлы. – 1996. – № 8. – С. 90–92.
4. *Свойства и применение дисперсных порошков* / В. И. Новиков и др. – К. : Наукова думка, 1986. – С. 108–114.
5. *Парицкая Л. Н.* Диффузионные процессы в дисперсных системах / Л. Н. Парицкая // Порошковая металлургия. – 1990. – № 11. – С. 44–58.
6. *Массоперенос при сварке давлением с применением ультрадисперсного порошка никеля* / А. В. Люшинский, В. Ф. Мазанко, М. М. Белякова, С. П. Ворона // Сварочное производство. – 1999. – № 6. – С. 10–14.
7. *Хансен М.* Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андрейко. – М. : Металлургиздат, 1962. – Т. 2. – С. 643.
8. *Баскин М. Л., Савин А. В., Туманов В. И., Эйдук Ю. А.* // Металлургия и топливо. – 1961. – № 4. – С. 111–114.
9. *Грузин П. Л.* Применение искусственно радиоактивных индикаторов для процессов изучения диффузии в сплавах / П. Л. Грузин // ДАН СССР. – 1952. – Т. 86, № 2. – С. 282–288.
10. *Felst E. A., Doherty R.D., J. Inst. Metals.* – 1971. – Vol. 99, № 3. – P. 102–103.
11. *Палатник Л. С., Левченко А. А., Богданова А. Ф., Терлецкий В. Е.* // ФММ. – 1958. – Т. 6, № 3. – С. 540–544.
12. *Baar N. Z. anorg. allg. Chem.* – 1911. – Vol. 70. – P. 353–358.
13. *Dreibholz D. Z. physic. Chem.* – 1924. – Vol. 108. – P. 8–11.
14. *Köster W., Schmidt W. Arch. Eisenhüttenw.* – 1934. – Vol. 8. – P. 23–27.
15. *Самсонов Г. В.* Физико-химические свойства элементов : справочник / Г. В. Самсонов. – К. : Наукова думка, 1965. – С. 807.