

DOI: 10.17516/1999-494X-0459

УДК 621.79

Investigation of the Structure of Layered Copper–Molybdenum Samples Produced by Explosion Welding and Construction of a 3D Model of Fractal Elements of a New Structure

Mikhail B. Leskov*,
Ludmila I. Kveglis, Rimma E. Sakenova,
Pavel O. Shalaev and Edgar I. Yakushevsky
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 00.11.2021, received in revised form 00.12.2021, accepted 21.02.2022

Abstract. The layered copper-molybdenum composite has high hardness and high chemical resistance, obtained by explosion welding. The use of this technology for obtaining a composite is associated with a low mutual solubility of copper and molybdenum. In explosion welding, the formation of a joint occurs due to short-term melting and very rapid solidification at the contact surface. Explosive welding reduces the activation barrier of a chemical reaction and makes it possible to obtain intermetallic compounds from two non-interacting components at a rate close to the rate of chemical bond switching. Products of mechanochemical reactions are formed in the contact zone of dissimilar metals. The products of mechanochemical reactions were detected by X-ray diffraction and microanalysis. High rates of physicochemical transformations are initiated by nonlinear waves of localized plastic deformation. Waves of plastic deformation were revealed after etching of a thin section of a cross section of a multilayer sample and a study of the microstructure. An estimate of the energy flux to the sample during explosion welding was made, and an analysis was made of the structural features of the copper and molybdenum bonding zones. The fractal dimension of the interface between copper and molybdenum is determined. A cluster model of the medium order structure (mesostructure) of the zones of copper and molybdenum bonding is constructed.

Keywords: plastic deformation waves, explosion welding, copper, molybdenum, mechanochemistry, intermetallic compounds, composite, microhardness, fractal dimension, 3D cluster model.

Acknowledgements. The authors are grateful for the help in carrying out the experiment to the staff of the Siberian Federal University A. M. Tokmin, G. M. Zeer, A. K. Abkarian and the staff of the Institute of Hydrodynamics. M. A. Lavrentiev SB RAS for kindly provided samples.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: leskovmb@gmail.com

Citation: Leskov M. B., Kveglis L. I., Sakenova R. E., Shalaev P. O., E. I. Yakushevsky E. I. Investigation of the structure of layered copper–molybdenum samples produced by explosion welding and construction of a 3d model of fractal elements of a new structure. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(8), 962–974. DOI: 10.17516/1999-494X-0459

Исследование структуры слоистых образцов медь–молибден, полученных сваркой взрывом, и построение 3D-модели фрактальных элементов новой структуры

М. Б. Лесков*, Л. И. Квеглис,
Р. Е. Сакенова, П. О. Шалаев, Э. И. Якушевский
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Слоистый композит медь–молибден обладает высокой твердостью и высокой химической стойкостью, получен сваркой взрывом. Использование такой технологии получения композита связано с малой взаимной растворимостью меди и молибдена. При сварке взрывом образование соединения происходит благодаря кратковременному расплавлению и очень быстрому затвердеванию на контактной поверхности. Сварка взрывом уменьшает активационный барьер химической реакции и позволяет получать интерметаллиды из двух не взаимодействующих компонентов со скоростью, близкой к скорости переключения химической связи. Формируются продукты механохимических реакций в зоне контакта разнородных металлов. Продукты механохимических реакций обнаружены методами рентгеновской дифракции и микроанализа. Высокие скорости физико-химических превращений инициируются нелинейными волнами локализованной пластической деформации. Волны пластической деформации выявлены после травления шлифа поперечного среза многослойного образца и исследования микроструктуры. Сделана оценка потока энергии на образец во время сварки взрывом, а также проведен анализ особенностей структуры зон соединения меди и молибдена. Определена фрактальная размерность границы соединения меди и молибдена. Построена кластерная модель структуры среднего порядка (мезоструктуры) зон соединения меди и молибдена.

Ключевые слова: волны пластической деформации, сварка взрывом, медь, молибден, механохимия, интерметаллиды, композит, микротвердость, фрактальная размерность, кластерная 3D-модель.

Благодарность: Авторы благодарят за помощь в проведении эксперимента сотрудников СФУ А. М. Токмина, Г. М. Зеер, А. К. Абкаряна и сотрудников Института Гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН за любезно предоставленные образцы.

Цитирование: Лесков М. Б. Исследование структуры слоистых образцов медь–молибден, полученных сваркой взрывом, и построение 3D-модели фрактальных элементов новой структуры / М. Б. Лесков, Л. И. Квеглис, Р. Е. Сакенова, П. О. Шалаев, Э. И. Якушевский // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(8). С. 962–974. DOI: 10.17516/1999-494X-0459

Введение. Перспектива получения новых материалов с объединением различных свойств в одном композите предполагает применение этих материалов для создания тепло- и электропроводников, электроконтактов и электродов для контактной сварки нового поколения [1]. Такая задача является приоритетной в материаловедении. Для решения этой задачи авторами ранее были рассмотрены такие системы, как Ti–Al и другие, полученные методом сварки взрывом [2–5].

Сварка взрывом позволяет получить уникальные композиты благодаря широкому диапазону соединяемых металлов. Данный метод также позволяет получать интерметаллиды – химические вещества из двух и более металлов. Они интересны тем, что обладают высокой твердостью и высокой химической стойкостью. В работе [6] раскрывается технологический процесс упрочнения металлов взрывом.

Возможности сварки взрывом связаны с экстремальностью процессов при высоких скоростях, давлениях и температурах. При сварке взрывом в результате высокоскоростного соударения двух металлов происходит образование кумулятивной струи. Уплотнение, нагрев и деформирование сопровождают образование контакта между частицами. Согласно гидродинамической теории свариваемые материалы текут подобно жидкостям. Их течение определяется углом соударения и скоростью точки контакта. Наличие таких процессов в твердом теле свидетельствует о высокой степени пластической деформации. Это приводит к повышению степени прочности соединения и контакта между материалами. Образование новых фаз в местах контакта твердых материалов называют твердофазными реакциями.

Пластическая деформация, протекающая в условиях неоднородного напряженного состояния, создается прежде всего в местах наибольших концентраций напряжений. Неоднородность поля напряжений приводит к неоднородности трансляционных потоков. Это всегда порождает поле поворотных моментов, что обуславливает волновой характер пластического течения твердых тел [7]. В общем случае в деформируемом теле возникает целый спектр волн пластической деформации различной длины, которые определяют иерархию структурных уровней деформации в заданной среде. В целом процесс пластической деформации представляется в виде распространения фронта волны активизации концентраторов напряжений [8].

Механохимические превращения обусловлены переходом вещества в метастабильное химически активное состояние и интенсивным массопереносом в результате поглощения механической энергии [9, 10].

В настоящее время активно исследуются твердофазные превращения, которые могут иметь место при пластической деформации. Механическое воздействие формирует продукты механохимических реакций в зоне контакта разнородных металлов. Высокие скорости физико-химических превращений инициируются нелинейными волнами локализованной пластической деформации. Для образования новых фаз в статических экспериментах требуется время (секунды, минуты, часы и более). При динамических нагрузках эти процессы завершаются за время порядка 10^{-5} – 10^{-7} с. Размеры частиц новой фазы могут достигать десятых долей миллиметров и более. При этом новая фаза, как правило, является неравновесной.

Твердость и микротвердость изделия характеризуют его долговечность. Можно выделить три главных фактора, от которых микротвердость зависит больше всего: 1) от природы металла – типа кристаллической решетки и величины межатомных сил; 2) от химического состава сплавов, имеющих как полезные компоненты, повышающие механические свойства, так и вредные примеси; 3) от условий кристаллизации металлов и сплавов, воздействующих на размер зерна, на температурный разброс кристаллизации, на размеры усадочных раковин и их число.

Рассматривая различные системы практически не растворимых материалов с интересными для нас свойствами, мы выбрали систему Cu-Mo.

Из диаграммы состояния равновесия системы Cu-Mo следует, что компоненты практически не растворимы друг в друге (при 950 °С составляет 1,5 вес.%) [11]. Для получения композита был применен метод сварки взрывом. Использование энергии взрыва переводит систему в неравновесное состояние, что дает возможность сплавления меди и молибдена в таких условиях.

Наличие описанного выше процесса сварки взрывом свидетельствует о высокой степени пластической деформации меди и повышенной степени прочности соединения и контактообразования с молибденом.

Цель данной работы – установить корреляцию структура-свойства в слоистых образцах Cu-Mo, полученных сваркой взрывом.

Задачи:

1. Исследовать структуру и микротвердость в слоистой системе Cu-Mo, полученной сваркой взрывом.
2. Исследовать продукты механохимических реакций в слоистых образцах медь-молибден, полученных сваркой взрывом.
3. На основании особенностей структуры слоистого образца оценить нагрузку на образец в процессе сварки взрывом.
4. Объяснить экспериментальные результаты с помощью кластерной 3D-модели, основанной на аномально быстром массопереносе как проявлении самоорганизации в градиентных полях.

Материал и методика эксперимента

Объектом исследования является слоистый образец Cu-Mo, полученный методом сварки взрывом. Технология изготовления опытных образцов проводилась в соответствии с требованиями ГОСТ 2601–84 для сварки взрывом.

Изучение структуры образца проведено на специально подготовленных плоских и гладких поверхностях – шлифах. Отдельно рассматривали поверхности разрыва образцов сваренных пластин. Приготовление шлифа заключалось в шлифовании и полировании. Для выявления структуры системы Cu-Mo использовали химическое травление. Структуру и химический состав поверхности шлифов исследовали на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer. D 1 и сканирующем электронном микроскопе с микроанализатором JEOL JSM-6480LV. Микротвердость измерена с помощью прибора «ПМТ-3М» с нагрузкой на индентор 0,5 Н. Информация о фазовом составе поверхностей разрыва образцов была получена после расшифровки картин рентгеновской дифракции, полученных на рентгеновском дифрактометре «BRUKER».

Результаты и их обсуждение

Для материалов Cu-Mo диапазон скоростей соударения, обеспечивающих получение прочного соединения, находится в пределах от 0,3 до 1,5 км/с [6]. При сварке взрывом в зоне соединения наблюдается образование волнистой контактной поверхности (рис. 1). Наличие волнистой поверхности свидетельствует о значительной пластической деформации меди и молибдена, что приводит к повышению прочности соединения.

На рис. 2а приведен график изменения микротвердости вдоль поперечного сечения в слоистом образце Mo-Cu. На графике видны максимальные значения микротвердости молибдена вблизи границы с медью.

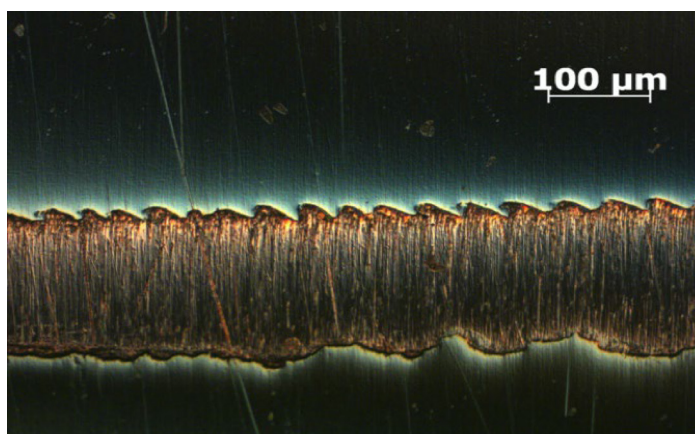


Рис. 1. Изображение микроструктуры слоистого образца Cu-Mo, содержащей две различные волны в медном слое между слоями молибдена

Fig. 1. Image of the microstructure of a layered Cu-Mo sample containing two different waves in a copper layer between molybdenum layers

Были получены дифракционные картины в двух зонах разорванного слоистого образца Cu–Mo (рис. 3 и 4). Расшифровка дифрактограмм приведена в табл. 1.

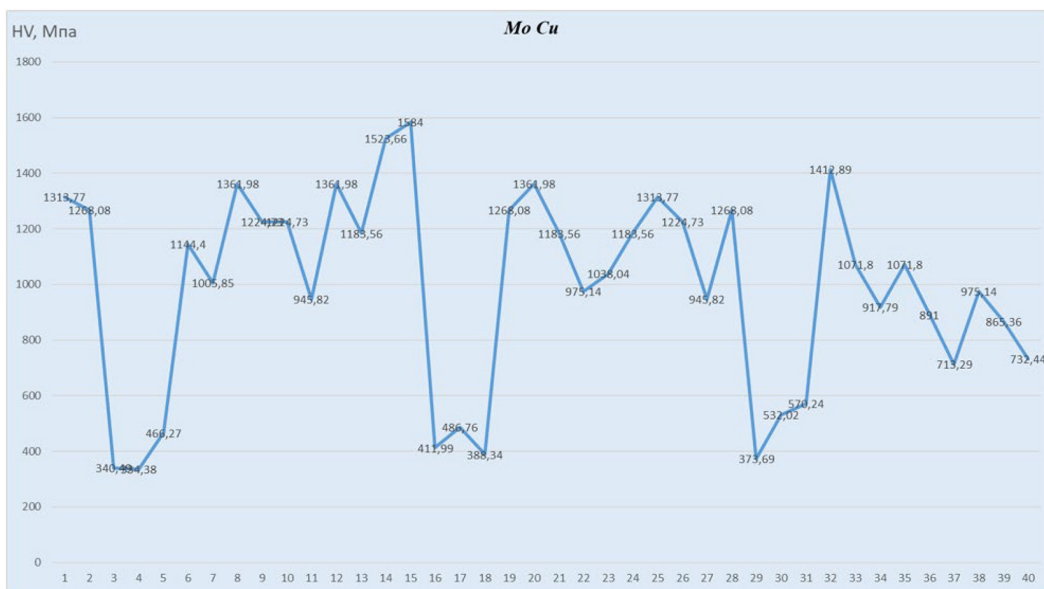
Сравнив результаты экспериментальных и табличных данных (табл. 1), а также проанализировав дифрактограммы, можно обнаружить неизвестные интерметаллиды, которые, по-видимому, повышают твердость на границах слоистого композита.

Обнаружено уменьшение параметра кристаллической решетки меди на величину более 0,5 %, то есть за пределом текучести. При дальнейшем исследовании с помощью растровой электронной микроскопии получены изображения поверхностей разорванного образца, представленные на рис. 5.

Таблица 1. Расшифровка дифрактограмм разорванного слоистого образца Cu–Mo

Table 1. Interpretation of X-ray diffraction patterns of a broken Cu–Mo layered sample

№ реф-лекса	2θ	θ	d расчет	d экс	d табл	Δd
1	43,727	21,8635	2,06851	2,0758	CuFm3m111(hkl) 2,08	$\Delta d_k=0,011$ $\Delta d_\theta=0,004$
2	50,859	25,4295	1,79389	1,79722	CuFm3m200(hkl) 1,798	$\Delta d_k=0,004$ $\Delta d_\theta=0,00078$
3	64,356	32,178	1,44643	1,44666	MoIm3m200(hkl) 1,57	$\Delta d_k=0,12357$ $\Delta d_\theta=0,12334$
1'	38,055	19,0275	2,36270	2,3678	MoIm3m110(hkl) 2,22	$\Delta d_k=-0,1427$ $\Delta d_\theta=-0,1478$
1''	40,910	20,455	2,20421	2,2220	MoIm3m100(hkl) 2,22	$\Delta d_k=0,01579$ $\Delta d_\theta=-0,002$
1–2	43,694	21,847	2,06998	2,0758	CuFm3m111(hkl) 2,08	$\Delta d_k=0,01002$ $\Delta d_\theta=0,0042$
2–2	50,819	25,4095	1,79522	1,79722	CuFm3m200(hkl) 1,798	$\Delta d_k=0,00278$ $\Delta d_\theta=0,00078$



а



б

Рис. 2. а) зависимость значений микротвердости от расстояния на слоистом образце Cu–Mo; б) изображение зон соединения трёх слоев молибдена и двух слоев меди

Fig. 2. a) dependence of microhardness values on distance on a layered Cu–Mo sample; b) image of the zones of connection of three layers of molybdenum and two layers of copper

На рис. 5а приведено изображение в растровом электронном микроскопе участка поверхности разорванного слоистого образца, где чередующиеся светлые и темные полосы иллюстрируют волновой процесс с длиной волны $\lambda = 0,2$ мм. Отмечены точки, с которых получены данные химического состава и представлены в табл. 2 для рис. 5а. Волнообразные участки иллюстрируют чередование меди – темные полосы и молибдена – светлые полосы.

В зонах значительной пластической деформации, согласно уравнению Журкова (1), возможно появление интерметаллидов.

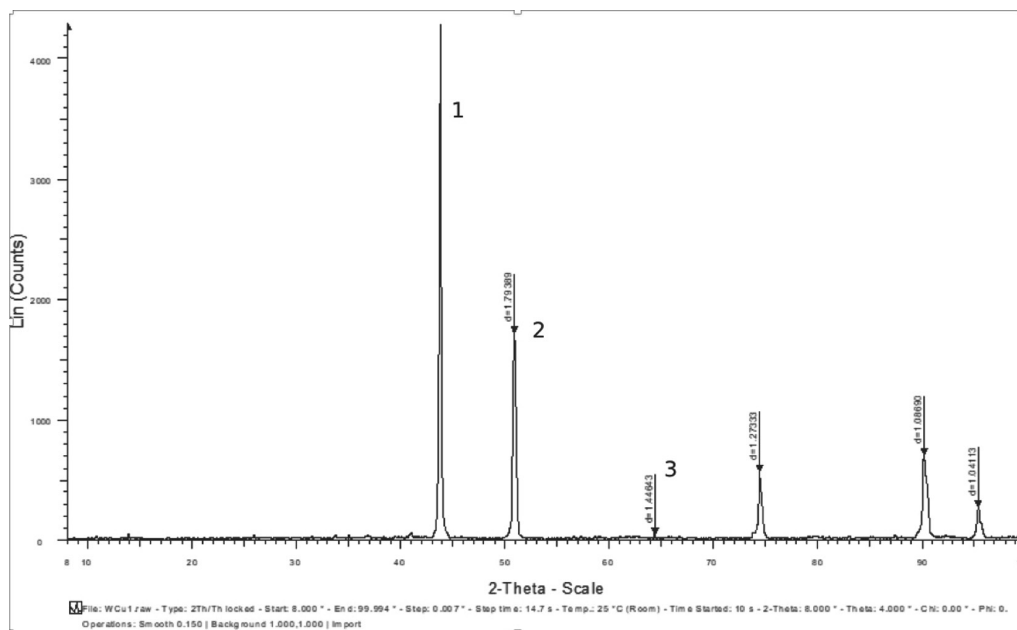


Рис. 3. Картина рентгеновской дифракции зоны отрыва молибдена от меди

Fig. 3. X-ray diffraction pattern of the zone of separation of molybdenum from copper

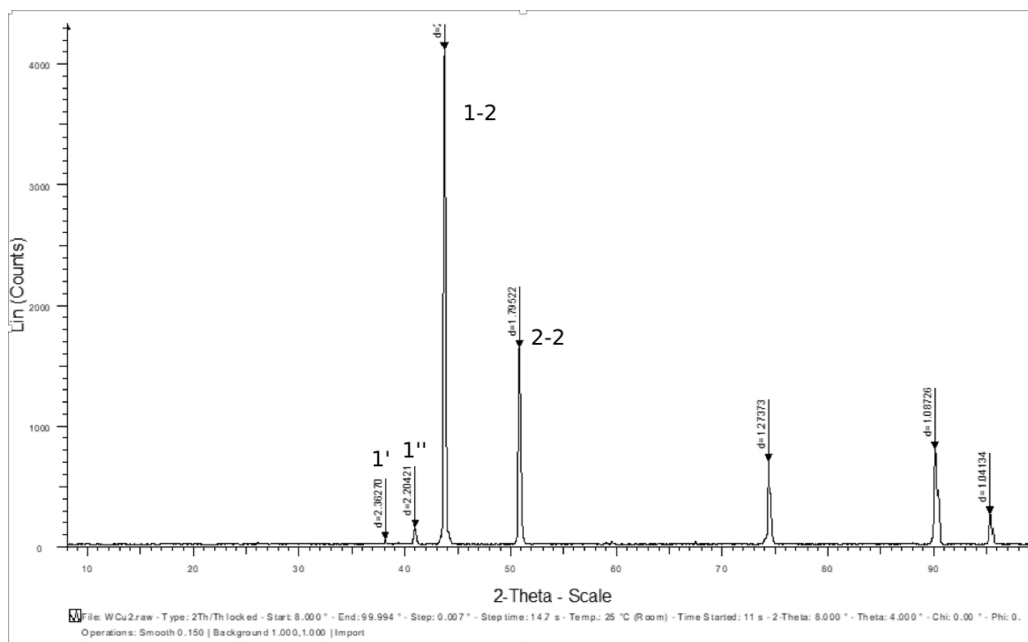


Рис. 4. Картина рентгеновской дифракции зоны отрыва меди от молибдена

Fig. 4. X-ray diffraction pattern of the zone of separation of copper from molybdenum

Таблица 2. Элементный состав спектров, вес.%

Table 2. Elemental composition of spectra, wt.%

Spectrum	Cu	Mo	Total
Spectrum 1	100.00	0	100.00
Spectrum 2	100.00	0	100.00
Spectrum 3	0.69	99.31	100.00

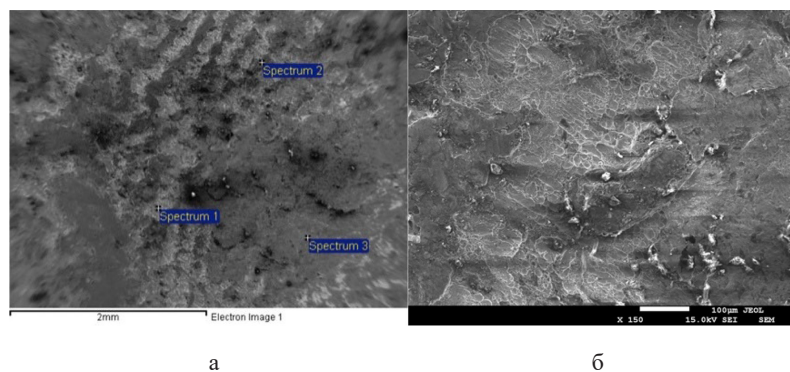


Рис. 5. Изображение поверхности разорванного образца со стороны меди: а) масштаб 2 мм; б) масштаб 100 мкм

Fig. 5. Image of the surface of a torn sample from the copper side: a) scale 2 mm; b) scale 100 µm

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{E_a - \gamma' \sigma}{RT} \quad (1)$$

Уравнение Журкова [12] определяет время жизни металлического изделия τ . Здесь τ_0 – время переключения химической связи, равное 10^{-13} с; E_a – энергия активации механохимической реакции; γ' – объем активированных атомов; σ – локальная нагрузка, действующая на активированные атомы; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Химическая реакция между двумя исходными веществами происходит только в результате смещения атомов этих веществ на критическое расстояние. Для этого нужно преодолеть определенный энергетический барьер E_a . При сварке взрывом возможно существенно уменьшить этот барьер, согласно уравнению Журкова, где $\sigma \gamma'$ уменьшает активационный барьер и позволяет получать интерметаллиды из двух невзаимодействующих компонентов со скоростью, близкой к скорости переключения химической связи.

Для определения энергии переключения химической связи вернемся к рассмотрению рис. 2. Приведено изображение различных волновых поверхностей соединения Cu-Mo. Длины волн на рис. 2 составляют $\lambda \sim 0,2$ мм и более. Известно, что если длина волны составляет доли миллиметра, то это СВЧ-излучение с частотой $\sim 300 \times 10^9$ Гц.

Тогда плотность энергии составит 120 кДж/моль, что позволяет расплавить медь в зоне ее соединения с молибденом и создать кумулятивные струи. Авторы [13] исследовали проблему поведения текущей жидкости в модели агрегации, ограниченной диффузией, и достигли существенного успеха в описании гидродинамических систем. Агрегация, ограниченная диффу-

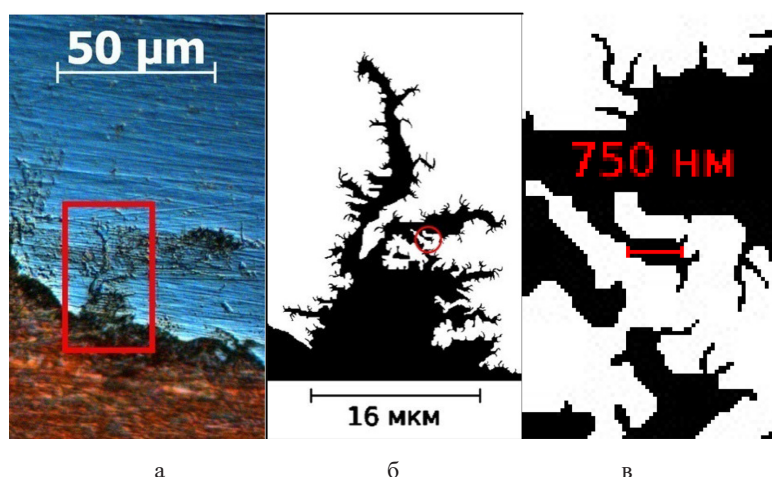


Рис. 6. а) изображение зоны соединения меди и молибдена; б) увеличенный и оттененный фрагмент участка; в) увеличенный участок фрактальной линии контакта меди и молибдена

Fig. 6. a) image of the zone of connection of copper and molybdenum; b) enlarged and shaded fragment of the site; c) an enlarged section of the fractal contact line of copper and molybdenum

зией, подобна проблеме Саффмана-Тэйлора в случае нулевого поверхностного натяжения. Последнее порождает высокую нестабильность интерфейса. В модели агрегации, ограниченной диффузией, интерфейс так нестабилен, что порождает фрактальную структуру. На рис. 6а приведено изображение зоны соединения меди и молибдена и увеличенный, оттененный фрагмент (рис. 6б). Сделана оценка фрактальной размерности.

С целью оценки количества переключений химических связей, потребовавшихся для образования контакта и новой фазы, требуется измерить длину линии контакта меди и молибдена. Для этого нужно знать фрактальную размерность линии контакта. Фрактальные образы с успехом используются при описании хаотического поведения нелинейных динамических и диссипативных систем. Фрактальная размерность – величина дробная и в данном случае может быть больше или равна 1. При этом если линия выглядит гладкой, должна иметь размерность, близкую к 1, а чем более изрезанной она является, тем ближе её размерность к значению 2. Таким образом, измерить длину такой линии можно только приблизительно, задаваясь параметром δ – длиной отрезка прямой, которым «сглаживают» изгибы [14]. Длина фрактальной линии $L(\delta)$ может быть аппроксимирована функцией вида:

$$L(\delta) = A\delta^{1-D}, \quad (2)$$

где A является положительной константой, а D – константой, называемой фрактальной размерностью.

Для расчета был выбран увеличенный и оттененный фрагмент участка изображения зоны соединения меди и молибдена (рис. 6б). По методике, описанной в работе [15], определить фрактальную размерности D фрактальной линии можно при использовании квадратных сеток разного масштаба. В качестве основы для расчётов используется формула (2), тогда:

$$m\delta = A\delta^{1-D}. \quad (3)$$

Накладывая последовательно на исследуемую фрактальную линию квадратные сетки с размерами стороны $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ подсчитывается соответствующее число квадратов m_1, m_2, \dots, m_n . Число n различных сеток должно быть таким, чтобы по числу n точек можно было построить график. Разумно брать $n \geq 5$.

Квадратные сетки изготавливались на компьютере в фоторедакторе посредством группирования горизонтальных и вертикальных линий, которые накладывались на шаблон сетки, встроенной в программу. Были изготовлены и использованы квадратные сетки, со следующим рядом размеров ячеек (в нм): 2000×2000 ; 1000×1000 ; 500×500 ; 250×250 ; 50×50 (рис. 8). По этим изображениям было посчитано совокупное число квадратов сетки m , которые пересекали линию. Все нужные данные для получения значения фрактальной размерности и длины фрактальной линии были посчитаны и внесены в табл. 3.

Подробности расчета опущены, указаны только полученные значения. Фрактальная размерность исследуемой линии $D=1,22$. Для расчета длины линии требуется выбрать параметр сглаживания δ , тогда $L=1018591,388 \cdot \delta^{-0,22}$. Таким образом, формула фрактальной длины линии позволяет на практике рассчитать протяжённость линии контакта на разных масштабных уровнях.

Нами предложена 3-мерная модель формирования фрактального нанокластера из меди на атомном и далее на мезомасштабном уровне в зонах локализации пластических деформаций. Вызванные волнами пластической деформации смещения отдельных атомов и их групп (кластеров) из равновесных положений приводят к кооперативным формированиям связанных нанокластеров. В. С. Крапошиным [16] предложен винтообразный нанокластер как структур-

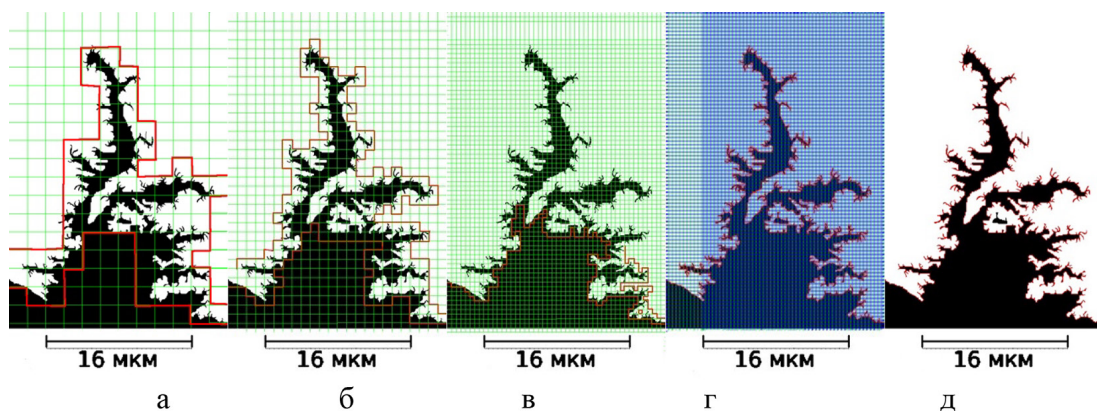


Рис. 7. Изображение оттененной линии контакта меди и молибдена с наложенными сетками в масштабе: а) 2000×2000 нм; б) 1000×1000 нм; в) 500×500 нм; г) 250×250 нм; д) 50×50 нм

Fig. 7. Image of the shaded contact line of copper and molybdenum with superimposed grids on a scale: a) 2000×2000 nm; b) 1000×1000 nm; c) 500×500 nm; d) 250×250 nm; e) 50×50 nm

Таблица 3. Число квадратов сетки при разных размерах ячеек

Table 3. Number of grid squares for different cell sizes

δ [нм]	2000	1000	500	200	50
m [шт]	82	223	548	1762	9222

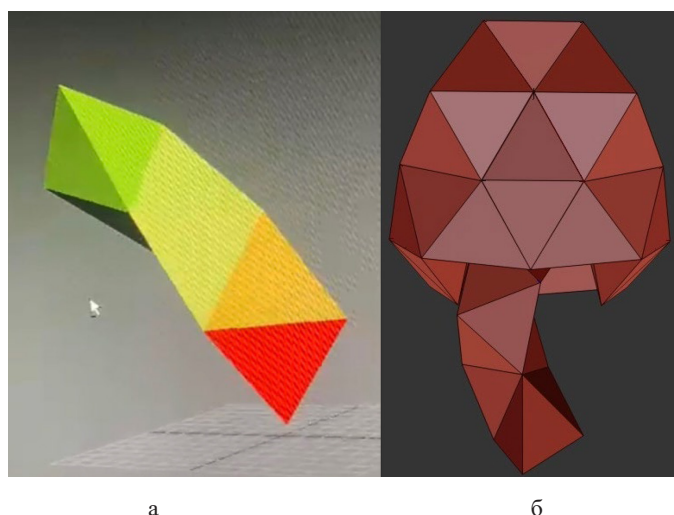


Рис. 8. а) 3D-кластерная модель медной струи; б) 3D-модель фрагмента фрактальной медной структуры, представленной на вырезке рис. 6в

Fig. 8. a) 3D cluster model of a copper jet; b) 3D model of a fragment of a fractal copper structure shown in the cutout in Fig. 6v

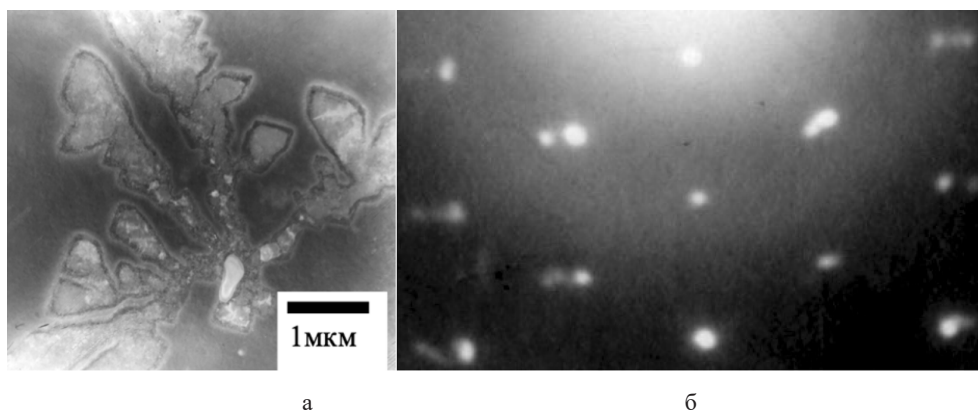


Рис. 9. Электронно-микроскопическое изображение пленок $Dy_{23}Co_{77}$ после воздействия слабого электронного пучка в просвечивающем электронном микроскопе [17]: а) изображение монокристаллита с фрактальной морфологией; б) дифракционная картина, полученная с этой пленки

Fig. 9. Electron microscopic image of $Dy_{23}Co_{77}$ films after exposure to a weak electron beam in a transmission electron microscope [17]: a) image of a single crystallite with a fractal morphology; b) diffraction pattern obtained from this film

ный элемент из семи тетраэдров, (рис. 8а). Нами предложена 3D-модель, где за основу взят винтообразный нанокластер, порождающий растущие далее нанокластеры за счет адаптации тетраэдров и октаэдров (рис. 8б). В результате формируются монокристаллиты с регулярной, но не периодической структурой. Плотность, а следовательно, твердость и прочность в зоне соединения меди и молибдена повышаются.

Для сравнения на рис. 9 приведено изображение монокристаллита с фрактальной морфологией, полученного взрывной кристаллизацией при внедрении жидкой фазы, образованной

нагревом электронным лучом аморфной пленки (*insitu*), в твердую фазу этой пленки. Дифракционная картина, полученная с этой пленки, свидетельствует об образовании монокристаллитов при взрывной кристаллизации.

Выводы

1. Исследована структура и фазовый состав зон разорванного соединения медь-молибден, полученного сваркой взрывом. Обнаружены интерметаллиды в зоне с большим содержанием молибдена.
2. Измерения микротвердости показывают, что участки молибдена, удаленные от зоны соединения с медью, имеют меньшую твердость. В зоне сварки микротвердость повышается.
3. Сделана оценка изменения длины волны пластической деформации на различных участках поверхности образца. Такая оценка позволяет объяснить механизм соединения нерастворимых друг в друге меди и молибдена за счет фрактального проникновения кумулятивных струй меди в вольфрам.
4. Предложена кластерная модель формирования морфологической нестабильности при сварке взрывом нерастворимых металлов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов производства композиционных материалов.

Список литературы/ References

- [1] Пиатти Дж. *Достижения в области композиционных материалов*. М., Metallurgia, 1982. 304 с. [Piatti, J. *Advances in Composite Materials*. Moscow, Metallurgiya, 1982. 304 p. (in Russian)].
- [2] Квеглис Л.И., Фадеев Т.В., Носков Ф.М., Лесков М.Б., Абылкалыкова Р.Б. Структурно-фазовые превращения в зонах локализации пластической деформации композита Ti-Al. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2019, 12(7), 852-860 [Kveglis L.I., Fadeev T.V., Noskov F.M., Leskov M.B., Abylkalykova R.B. Structural-phase transformation in the zone of localization of plastic deformation of the Ti-Al composite. *Journal of the Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2019, 12(7), 852-860 (in Russian)].
- [3] Лесков М.Б., Мали В.И., Носков Ф.М., Абкарян А.К., Квеглис Л.И. Формирование структурно-фазового состояния многослойного композита Al-Ti, полученного сваркой взрывом, при многостадийном отжиге. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019, 16(2), 249-255 [Leskov M.B., Mali V.I., Noskov F.M., Abkaryan A.K., Kveglis L.I. formation of the structural-phase state of the Al-Ti multilayer composite obtained by explosion welding during multi-stage annealing. *Fundamental problems of modern materials science*. 2019, 16(2), 249-255 (in Russian)].
- [4] Короткова Е.В., Лесков М.Б., Джес А.В., Волочаев М.Н., Квеглис Л.И. Твердофазные превращения в зонах контакта медь-вольфрам. *Цветные металлы и минералы, сборник докладов Десятого международного конгресса*. Красноярск, Научно-инновационный центр, 2018, 954-961 [Korotkova E.V., Leskov M.B., Jess A.V., Volochaev M.N., Kveglis L.I. Solid-phase transformation in copper-tungsten contact zones. *Non-ferrous metals and minerals collection of reports of the Tenth International Congress*. Krasnoyarsk, Scientific and Innovation Center, 2018, 954-961 (in Russian)].

- [5] Худяева А.А., Дмитриев М.С., Лесков М.Б., Абкарян А.К., Шелепова С.Ю. Структура сварного соединения алюминий-титан. *Конференция: Новые материалы и технологии*. Барнаул, АГУ, 2017, 5, 161-166 [Khudyayeva A.A., Dmitriev M.S., Leskov M.B., Abkaryan A.K., Shelepova S.Yu. The structure of the aluminum-titanium welded joint. *Conference: New materials and technologies*. Barnaul, AGU, 2017, 5, 161-166(in Russian)].
- [6] Дерибас А. А. *Физика упрочнения и сварки взрывом*. Новосибирск, Наука, 1980. 188 с. [Deribas A. A. *Physics of hardening and welding by explosion*. Novosibirsk, Nauka, 1980. 188 p. (in Russian)].
- [7] Моисеенко Д.Д., Панин В.Е., Елсукова Т.Ф. Роль локальной кривизны в волновом механизме зернограницного скольжения при деформации поликристалла. *Физическая мезомеханика*. 2013, 16(3), 81-93 [Moiseenko D.D., Panin V.E., Elsukova T.F. The role of local curvature in the wave mechanism of grain-boundary sliding during deformation of a polycrystal. *Physical mesomechanics*, 2013, 16(3), 81-93(in Russian)].
- [8] Shtertser A.A., Zlobin B.S. Flows, strains, and formation of joints in oblique collision of metal plates. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2015, 56(5), 927-935.
- [9] Авакумов Е.Г. *Механохимический синтез в неорганической химии*. Новосибирск, Наука, 1991. 263 с. [E.G. Avakumov *Mechanochemical synthesis in inorganic chemistry*. Novosibirsk, Nauka, 1991. 263 p.(in Russian)].
- [10] Мейерс М. А., Мурра Л.Е. *Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов*. М., Металлургия, 1984. 512 с. [Meyers M.A., Murra L.E. *Shock waves and phenomena of high-speed deformation of metals*. Moscow, Metallurgy, 1984. 512 p. (in Russian)].
- [11] Диаграммы состояния двойных металлических систем. Под общей редакцией Лякишева; т.2. М., Машиностроение, 1997. 1024 с. [Statedia grams of binary metallic systems. Under the general editorship of Lyakishev; v.2. Moscow, Mashinostroenie, 1997. 1024 p. (in Russian)].
- [12] Zhurkov S. N. Kinetic Concept of the Strength of Solids. *International journal of fracture*, 1965, 1, 311-323.
- [13] Langer S. Dendrites, viscous fingers, and the theory of pattern formation. *Science*, New York, 1989, 243, 1150.
- [14] Мандельброт Б. Б. Какова длина побережья Британии? Статистическое самоподобие и фрактальная размерность. *Арт-фрактал. Сборник статей*. СПб., Страта, 2015. 156 с. [Mandelbrot B.B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractal dimension. *Art fractal. Digest of articles*. St. Petersburg, Strata, 2015. 156 p. (in Russian)].
- [15] Федер Е. *Фракталы*. М., Мир, 1991. 261 с. [Feder E. *Fractals*. Moscow, Mir, 1991. 261 p. (in Russian)].
- [16] Крапошин В.С. Кристаллогеометрический механизм срастания шпинели. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2015, 7(721), 4-12 [Kraposhin V.S. Crystal-geometric mechanism of spinel in tergrowth. *Metal science and heat treatment of metals*, 2015, 7(721), 4-12 (in Russian)].
- [17] Мягков В.Г., Квеглис Л.И., Фролов Г.И. Фрактальная картина роста при взрывной кристаллизации аморфных плёнок Ду-Со, Рг-Ни. *Поверхность*. 1992, 9, 131 – 134 [Myagkov V.G., Kveglis L.I., Frolov G.I. Fractal pattern of growth during explosive crystallization of amorphous Ду-Со, Рг-Ни films. *Surface*. 1992, 9, 131 – 134 (in Russian)].