

УДК 539.388: 620.22:621.7

## Исследование процессов структурообразования при сварке взрывом меди и молибдена

*П.О. Шалаев, Л.И. Квеглис, Ф.М. Носков, Т.В. Фадеев*

Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

## Structure Formation Processes During Explosive Welding of Copper and Molybdenum: A Research Study

*P.O. Shalaev, L.I. Kveglis, F.M. Noskov, T.V. Fadeev*

Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

Исследованы образцы композитного материала Cu-Mo, полученные сваркой взрывом. Измерена микротвердость данных образцов, проведены исследования их структуры при помощи методов оптической и электронной микроскопии с микроанализом, проведено картирование меди и молибдена на участке этой границы Cu-Mo. В ходе исследований выявлена сложная фрактальная линия границы Cu-Mo и обнаружены темные участки на этой границе, которые могут представлять собой новую фазу. В ходе измерения микротвердости обнаружено повышение твердости как меди и молибдена по сравнению со стандартными значениями для отожженных образцов меди и молибдена соответственно, так и дополнительный рост твердости молибдена на границе с медью, что также может свидетельствовать об образовании новой фазы. Новая фаза обнаружена в ходе исследований при помощи электронной микроскопии и картирования участков меди и участков молибдена на границе Cu-Mo. Так как медь и молибден в равновесных условиях не образуют ни твердых растворов, ни эвтектик, ни интерметаллидов и новая фаза существует только в неравновесных условиях, она была названа «вынужденная эвтектика».

**Ключевые слова:** медь, молибден, неравновесное фазообразование, электронная микроскопия, оптическая микроскопия, сварка взрывом.

DOI: 10.14258/izvasu(2023)1-11

### Введение

Композиционные материалы на основе меди и тугоплавких металлов представляют большой интерес, так как позволяют объединить такие свойства меди, как высокие тепло- и электропроводность с высокой прочностью, жаростойкостью и коррозионной стойкостью молибдена. Это перспективные материалы, которые могут помочь открыть новые возможности, например, в изготовлении теплообменников, тепло-

The present study investigates samples of Cu-Mo composite material produced through explosive welding. The microhardness of these samples is measured and their structures are analyzed using optical and electron microscopy methods. Copper and molybdenum regions are mapped at the Cu-Mo boundary. The analysis reveals a complex fractal line and dark areas at this boundary, indicating the formation of a new phase.

Microhardness measurements indicate that the hardness of both copper and molybdenum increases in comparison to standard values for annealed samples of copper and molybdenum, respectively. Furthermore, the hardness of molybdenum increases at the interface with copper, which may also suggest the formation of a new phase.

The electron microscopy analysis and mapping of copper and molybdenum regions at the Cu-Mo interface confirm the presence of a new phase, which is referred to as "forced eutectic." This is because copper and molybdenum do not typically form solid solutions, eutectics, or intermetallic compounds under equilibrium conditions. The new phase exists only under nonequilibrium conditions.

**Key words:** copper, molybdenum, non-equilibrium phase formation, electron microscopy, optical microscopy, explosion welding.

и электропроводников, электроконтактов и электродов для контактной сварки [1, 2].

Диаграмма состояния Cu-Mo (рис. 1) в настоящий момент построена только расчетным методом, так как медь и молибден не смешиваются в жидком и твердом состояниях. Однако сварка взрывом создает высокие градиенты давления, температуры и концентраций, что открывает возможности для образования различных неравновесных структур. При этом влияние техно-

логии получения на структуру и механические свойства композиционных материалов из молибдена и меди изучено недостаточно [3, 4]. Таким образом, весьма акту-

альным является исследование влияния сварки взрывом меди и молибдена на процессы структурообразования в слоистом медно-молибденовом композите.

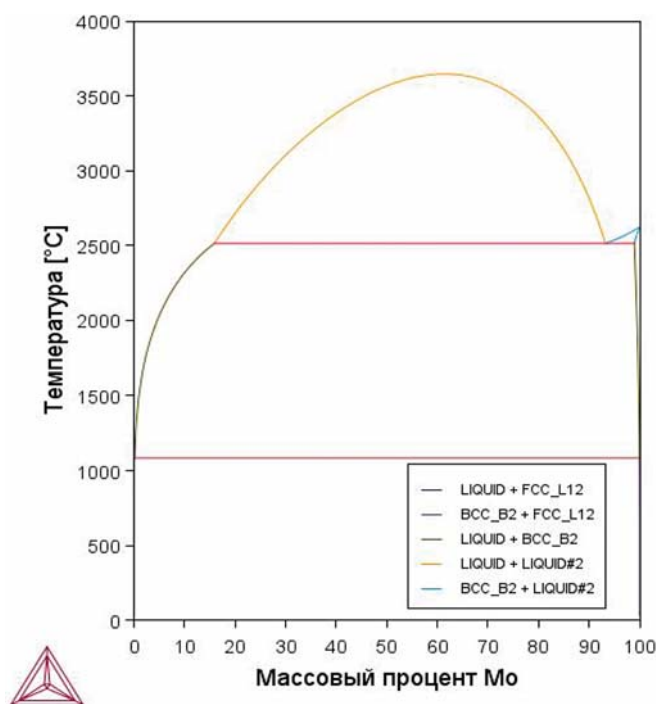


Рис. 1. Диаграмма состояния системы сплавов Cu-Mo, полученная при помощи программного комплекса ThermoCalc

Целью данной работы было исследовать структуру и механические свойства, а также особенности структурообразования в слоистой системе Cu-Mo, подвергнутой пластической деформации взрывом.

#### Образцы и методы исследования

Образцы композиционного материала (КМ) получены сваркой взрывом многослойного пакета пластин технической меди (марка М1) толщиной 0,3 мм и пластин молибдена (марка МЧ) толщиной 0,5 мм. Пакет из чередующихся 7 медных и 7 молибденовых пластин сваривали взрывом одним зарядом взрывчатого вещества аммонита 6ЖВ по методике, описанной в работе [5].

Изучение структуры образца проводили на специально подготовленных плоских и гладких поверхностях — микрошлифах. Общий вид микрошлифа образца показан на рисунке 2.



Рис. 2. Общий вид опытных образцов системы Cu-Mo, полученных методом сварки взрывом

В ходе работы были проведены исследования при помощи оптического микроскопа (CarlZeiss Axio Observer.D1) и сканирующего электронного микроскопа с микроанализатором (FEI Quanta 650 FEG). Проведены измерения микротвердости с помощью прибора «ПМТ-3М».

#### Экспериментальные результаты

На рисунке 3 показана структура композиционного материала медь — молибден, полученного сваркой взрывом. На рисунке 3а в центре расположен слой меди, сверху и снизу — слои молибдена. При сварке взрывом в зоне соединения наблюдается образование волнистой контактной поверхности. Волны имеют асимметричный характер, что связано с различной плотностью свариваемых металлов, а также с наличием градиента нагрузки [6].

На рисунке 3б видна граница между медью и молибденом при большем увеличении. Эта граница имеет сложную форму. Также на границе имеются темные участки, наличие которых позволяет предположить существование новых фаз. Фрагмент такого участка показан на рисунке 3в. На этом изображении видна фрактальная структура границы Cu-Mo. Основываясь на визуальном наблюдении и сравнении с литературными данными [7], предполагаем фрактальный рост новой фазы Cu-Mo вглубь молибденового слоя.

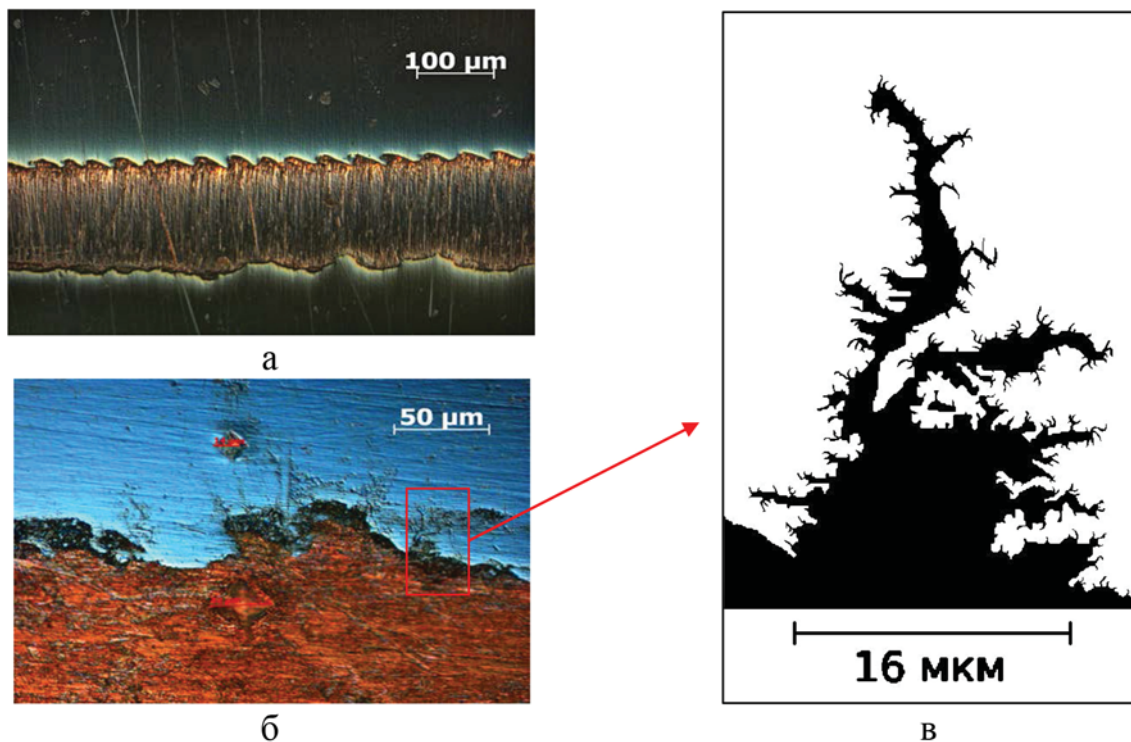


Рис. 3. Структура образца в зоне соединения молибдена и меди после сварки взрывом: а — микроструктура, содержащая две различные волны в медном слое между слоями молибдена; б — микроструктура зоны контакта меди и молибдена; в — оттененный фрагмент границы Cu-Мо, выделенный квадратом на рисунке б

На рисунке 4 представлены данные о микротвердости HV (МПа) компонентов КМ и переходных зон. Более низкая твердость соответствует Cu, более высокая — Mo. Следует отметить, что в переходной зоне со стороны молибдена микротвердость выше, чем внутри молибденовой пластины. Из этого рисунка

также видно, что показатели микротвердости компонентов увеличились по сравнению с микротвердостью отожженных меди и молибдена. Это тоже может свидетельствовать о появлении новых фаз на границе Cu-Мо.



Рис. 4. Данные о микротвердости HV (МПа) компонентов КМ и переходных зон между медью и молибденом

При помощи сканирующей электронной микроскопии получены изображения границы между двумя металлами, а также проведено картирование меди и молибдена на участке этой границы. Результаты представлены на рисунке 5. Видно, что на границе между медью и молибденом происходит формирование фрактальной поверхности приграничной зоны, при этом образуется мелкодисперсная смесь зерен молибдена и зерен меди. Размер этих зерен меньше по-

рядка 1 мкм, т.е. структура наномасштабна, как если бы наблюдалась эвтектика. С учетом того что медь и молибден при равновесных условиях не растворимы друг в друге, предполагается возникновение вынужденной эвтектики (дисперсной структуры, формируемой в неравновесных условиях) на наноразмерном уровне. Модель подобного процесса была предложена в работе [8] и представлена на рисунке 6.

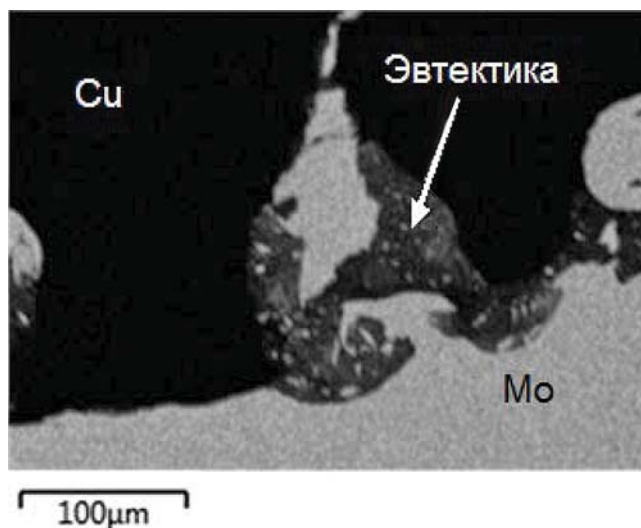


Рис. 5. Электронно-микроскопическое исследование образца КМ Cu-Mo. Карты меди и молибдена

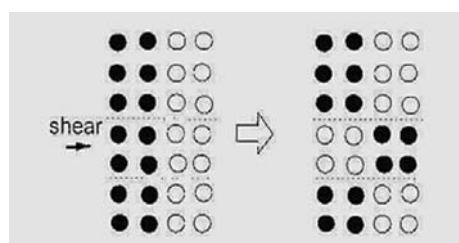


Рис. 6. Модель смешивания со сдвигом в процессе механохимической реакции [8]

### Заключение

В представленной работе исследовали продукты твердофазных реакций, возникающие при взаимодействии двух компонентов — меди и молибдена при формировании слоистого композиционного материала под давлением (сварка взрывом), а также продукты механохимических реакций в указанных материалах при их совместном деформировании на гидравлическом прессе.

Показано, что при сварке под давлением молибдена и меди образуются межслойные границы волнообразной формы, характерные для данного вида сварки. Обнаружено, что воздействие взрывной волны привело к усложнению поверхности границы медь — молибден и приобретению этой поверхностью фрактальной формы.

Показано, что микротвердость выше в зоне соединения меди и молибдена, где происходит вынужденное перемешивание нерастворимых друг в друге компонентов. Установлено, что в результате воздействия взрывной волны образовалась мелкодисперсная наномасштабная структура, подобная эвтектике, которая была названа вынужденной эвтектикой.

*Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры МиТОМ ПИ Сибирского федерального университета к.т.н. Александру Михайловичу Токмину и к.т.н. Галине Михайловне Зеер за помощь в проведении экспериментов, а также сотрудникам Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН за любезно предоставленные образцы.*

### Библиографический список

1. Пиатти Дж. Достижения в области композиционных материалов. М., 1982.
2. Gorbatyuk S., Pashkov A., Chichenev N. Improved Copper-Molybdenum Composite Material Production Technology // *Materials Today Proceedings*. 2019. Vol. 11. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.12.102>.
3. Munagala S. Ch., Ajit K. N., Navya K., Tapas L, Siddhartha R.. (2022) Review on developments of bulk functionally graded composite materials // *International Materials. Reviews*. 67:8. <https://doi.org/10.1179/1432891715Z.0000000001366>.
4. Кербер М.Л. Композиционные материалы // *Сороковский образовательный журнал РХТУ им. Д. И. Менделеева*. 1999. № 5.
5. Разумов И.К, Ермаков А.Е, Горностырев Ю.Н, Струмал Б.Б. Неравновесные фазовые превращения в сплавах при интенсивной пластической деформации // *УФН*. 2020. DOI: 10.3367/UFNr.2019.10.038671.
6. Mali V.I., Pavliukova D.V., Bataev I.A., Bataev A.A., Smirnov A.A., Yrtsev P.S., Bazarkina V.V. Formation of the intermetallic layers in Ti-Al multilayer composites // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 311–313.
7. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом ; 2-е изд., доп. и перераб. Новосибирск, 1980.
8. Федер Е., Фракталы. М., 1991.
9. Takacs L. Mechanochemistry and the other branches of chemistry: Similarities and differences, INCOME. 2011.