

Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23. № 3. С. 313-322

Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 2026; 3(23): 313-322

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 539.213.536

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.004

АНОМАЛЬНЫЙ МАССОПЕРЕНОС ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ МЕДИ И МОЛИБДЕНА

**Михаил Борисович Лесков¹, Людмила Иосифовна Квеглис², Федор Михайлович Носков³,
Александр Георгиевич Анисимов⁴, Михаил Николаевич Волочаев⁵**

^{1,2,3}Сибирский федеральный университет, пр. Свободный 79, г. Красноярск, 660074, Россия

⁴Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, пр. ак. Лаврентьева 15, г. Новосибирск, 630090, Россия

⁵Институт физики им. Киренского СО РАН, Академгородок, 50, строение № 38, г. Красноярск, 660036, Россия

¹leskovmb@ya.ru, 0009-0008-8387-4868

²kveglis@list.ru, 0000-0002-6850-354X

³fnoskov@sfu-kras.ru, 0009-0002-3985-8947

⁴anis@hydro.nsc.ru, 0000-0002-0244-2246

⁵volochaev@iph.krasn.ru, 0000-0001-6245-4153

Аннотация. В статье исследованы процессы структурообразования протекающие при совместной пластической деформации взрывом меди и молибдена. Методами электронной микроскопии обнаружено возникновение аномально быстрого массопереноса и образования новых фаз при совместной пластической деформации разнородных металлов. Показано, что самоорганизация структуры происходит на различных масштабных уровнях. В локализованных областях развивается релаксация структурных состояний в условиях нелинейности течения пластической деформации. В масштабе свариваемых взрывом пластин это проявляется в виде характерного рельефа зоны контакта медь-молибден. В масштабе зеренной структуры наблюдается формирование дендритов и каналов массопереноса. На атомно-кристаллическом уровне структуры релаксация проявляется образованием твердых растворов нерастворимых в обычных условиях компонентов.

Ключевые слова: медь-молибден, пластическая деформация, сварка взрывом, твердые растворы, массоперенос, дендриты.

Для цитирования: Лесков М.Б., Квеглис Л.И., Носков Ф.М., Анисимов А.Г., Волочаев М.Н. Аномальный массоперенос при сварке взрывом меди и молибдена // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 3. С. 313-322. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.004.

Original article

ANOMALOUS MASS TRANSFER IN EXPLOSIVE WELDING OF COPPER AND MOLYBDENUM

Mikhail B. Leskov¹, Lyudmila I. Kveglis², Fyodor M. Noskov³, Alexander G. Anisimov⁴,
Mikhail N. Volochaev⁵^{1,2,3} Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk, 660074, Russia⁴ Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, 15 Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia⁵ Kirensky Institute of Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 50, building No. 38, Krasnoyarsk, 660036, Russia¹leskovmb@ya.ru, 0009-0008-8387-4868²kveglis@list.ru, 0000-0002-6850-354X³fnoskov@sfu-kras.ru, 0009-0002-3985-8947⁴anis@hydro.nsc.ru, 0000-0002-0244-2246⁵volochaev@iph.krasn.ru, 0000-0001-6245-4153

Abstract. This article examines the structure formation processes occurring during combined explosive plastic deformation of copper and molybdenum. Electron microscopy revealed the occurrence of anomalously rapid mass transfer and the formation of new phases during combined plastic deformation of dissimilar metals. It is shown that structural self-organization occurs at various scales. Relaxation of structural states develops in localized regions under nonlinear plastic deformation conditions. At the scale of explosively welded plates, this manifests itself as a characteristic relief of the copper-molybdenum contact zone. At the grain structure scale, the formation of dendrites and mass transfer channels is observed. At the atomic-crystalline level of the structure, relaxation manifests itself as the formation of solid solutions of components insoluble under normal conditions.

Keywords: copper-molybdenum, plastic deformation, explosive welding, solid solutions, mass transfer, dendrites.

For citation: Leskov M.B., Kveglis L.I., Noskov F.M., Anisimov A.G. & Volochaev M.N. (2026). Anomalous mass transfer during explosive welding of copper and molybdenum. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(3), 313-322 (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.004.

Введение

Исследование свойств композитов и физико-химических процессов, происходящих при сварке взрывом, даёт возможность получать материалы с уникальными свойствами, что открывает новые возможности для решения актуальных проблем [1, 2]. Группа композиционных материалов, состоящая из разнородных металлов с ограниченной взаимной растворимостью, в настоящее время вызывает особый интерес, так как компоненты таких композитов объединяют в себе разнообразные свойства, что говорит о широком диапазоне их возможного использования. Например, композиционные материалы на основе меди и тугоплавких металлов имеют высокие прочностные характеристики и жаростойкость. Известно [3], что при увеличении объёма тугоплавкой фазы возрастает твёрдость композитов медь-молибден. Это перспективные материалы, которые могут по-

мочь открыть новые возможности, например, в изготовлении электродов для контактной сварки [4].

Диаграмма состояния Cu–Mo, в настоящий момент построена только расчетным методом, так как медь и молибден практически не смешиваются в жидком и твёрдом состояниях [5]. Влияние технологии получения на структуру и механические свойства композиционных материалов из молибдена и меди изучены недостаточно [6]. Поэтому актуальным является исследование влияния сварки взрывом меди и молибдена на процессы структурообразования в слоистом медно-молибденовом композите, в том числе вопросы, связанные с массопереносом компонентов композита, друг в друга.

Взаимопроникновение разнородных атомов под давлением могут вызвать как изменение деформационных свойств (эффект Ребиндера), так и развитие химических реакций с последующим образованием фазы этой реакции [7].

Интенсивная механическая обработка снимает кинетический запрет на перенос массы, и он может осуществляться на поверхности контакта, в приповерхностном слое или в объеме по механизмам, характерным для процессов трения или пластического деформирования [8]. В отличие от обычной диффузии, определяемой градиентами концентрации компонентов, данный вид диффузии получил название «деформационного атомного перемешивания» или «баллистической диффузии». Относительно сути этого процесса единого мнения о механизме деформационного атомного перемешивания до сих пор не существует [7, 9].

В предыдущих работах полученные образцы композита медь-молибден исследовались в том числе и рентгенофазовым методом. Показано [10], что помимо чистых компонентов (меди и молибдена) в составе образцов выявлен целый ряд фаз: твердый раствор на основе ОЦК-решетки молибдена, а также примитивные кубические кристаллические решетки с целым рядом параметров (табл. 1). Важно отметить особенность этого исследования, в котором не наблюдаются твердые растворы на основе ГЦК-решетки меди, хотя медь существенно пластичней молибдена.

Таблица 1. Сводная таблица выявленных фаз в системе медь-молибден после сварки взрывом [10]

Table 1. Summary table of identified phases in the copper-molybdenum system after explosive welding [10]

Тип кристаллической решетки	Параметр кристаллической решетки, Å	Комментарий
ОЦК	3,15	Чистый молибден, слой меди и молибдена
ГЦК	3,62	Чистая медь, слой меди и молибдена
ОЦК	2,99	Сварка взрывом, слой молибдена
ПК	3,52	Сварка взрывом, слой меди
ПК	3,82	Сварка взрывом, слой молибдена
ПК	4,01	Сварка взрывом, слой молибдена
ПК	4,02	Сварка взрывом, слой меди

Обращают на себя внимание параметр полученного твердого раствора на основе ОЦК-молибдена, они оказываются ниже, чем параметры чистого молибдена. Это объясняется [10] образованием не обыкновенного твердого раствора, а сверхструктуры, т.е. атомноупорядоченного твердого раствора, в котором атомы меди и молибдена занимают не любое, а некоторое определенное положение, что приводит к эффекту сверхструктурного сжатия.

Таким образом, цель работы: исследование и описание механизмов аномального массопереноса, которые протекают при совместной пластической деформации в локализованных областях композита медь-молибден.

Методика исследования

Образцы композиционного материала (КМ) получены сваркой взрывом многослойного пакета пластин технической меди (марка М1) толщиной 0,3 мм и пластины молибдена (марка МЧ) толщиной 0,7 мм. Пакет из чередующихся 7 медных и 7 молибденовых пластин сваривали

взрывом одним зарядом взрывчатого вещества аммонита 6ЖВ по методике, описанной в работе [11].

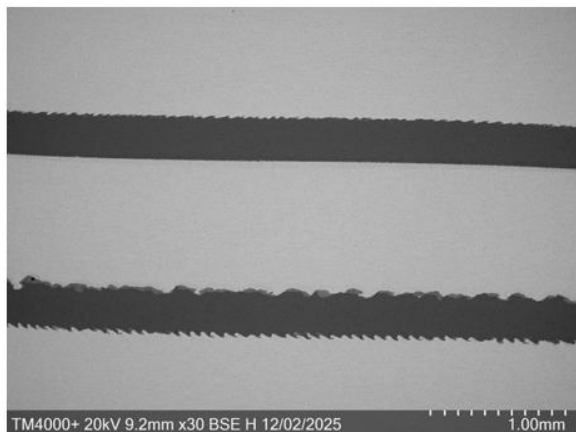
В ходе работы были проведены исследования при помощи сканирующего электронного микроскопа с энергодисперсионной приставкой (TM4000), и рентгенофазового анализа (Bruker).

Экспериментальные результаты

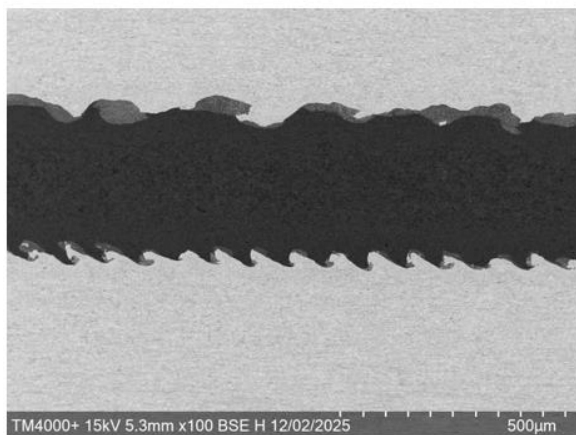
На рис. 1, а, б показана структура композиционного материала медь-молибден полученного сваркой взрывом. В центре рис. 1, б расположен слой меди, сверху и снизу – слои молибдена. Хорошо выражена зона контакта, которая имеет волнистую форму типичную для этого типа сварки.

Феноменологически известно, что чем больше электронов в фазе, исследуемой на растровом электронном микроскопе, тем сравнительно более ярко она будет выглядеть. Так на представленных изображениях (рис. 1 и 3) молибден выглядит намного более светлым,

чем медь. Это объясняется его электронным строением [12]. Соответственно области микроструктуры окрашенные в оттенки серого цвета – между медью и молибденом, представляют собой области, с каким-либо промежуточным составом.



а



б

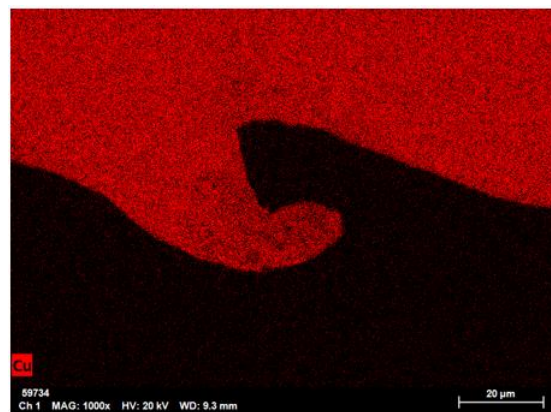
Рис. 1. Структура образца в зоне соединения молибдена и меди после сварки взрывом: а – общий вид; б – зона контакта: молибден (светлый) – медь (темная) – молибден (светлый)

Fig. 1. Structure of the sample in the junction zone of molybdenum and copper after explosion welding: a – general view; b – contact zone: molybdenum (light) – copper (dark) – molybdenum (light)

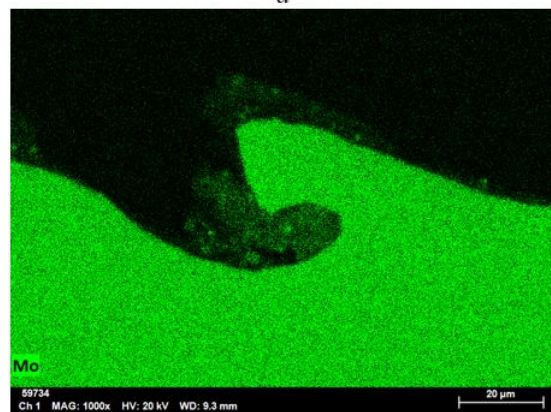
Видно, что компоненты взаимодействовали друг с другом с разной интенсивностью в разных участках образца. Так, в одних участках происходило активное взаимодействие и перемешивание компонентов (рис. 1, б), о чём можно судить и по размытой границе переходной зоны, и по визуальным признакам – цветовым оттенкам полученных твёрдых растворов. Это

может свидетельствовать о возникновении твёрдорастворного взаимодействия, наравне с чисто механическим. В других же областях, где условия взаимодействия были иными, интенсивность взаимного проникновения компонентов слабая (рис. 1, а, верхний слой меди).

Сканирующая электронная микроскопия позволяет провести исследование локального взаимодействия компонентов композита в переходной зоне. Были сняты несколько спектров для исследования взаимопроникновения меди и молибдена друг в друга. На рис. 2, а представлено электронно-микроскопическое изображение участка переходной зоны медь–молибден, с которого был снят спектр в лучах меди. Результаты подобного исследования этого же места в лучах молибдена представлены на рис. 2, б.



а



б

Рис. 2. Электронно-микроскопическое исследование образца Cu–Mo: а – спектр переходной зоны в лучах меди; б – это же место, снятое в лучах молибдена

Fig. 2. Electron microscopic study of a Cu–Mo sample: a – spectrum of the transition zone in copper rays; b – the same place photographed in molybdenum rays.

Видно (рис. 2, б), что растворение компонентов друг в друге происходило не равномерно

но, и преимущественно молибден проникал в медь, а не медь в молибден (рис. 2, *а*). В локальной области глубина переходной зоны образования твёрдых растворов составляет порядка нескольких десятков микрон.

При рассмотрении контактной зоны (рис. 3) в зоне перемешивания молибдена в медь наблюдаются дендриты твердого раствора (рис. 3, *б*) с разветвленными фрактально ветвями (см. также [13]).

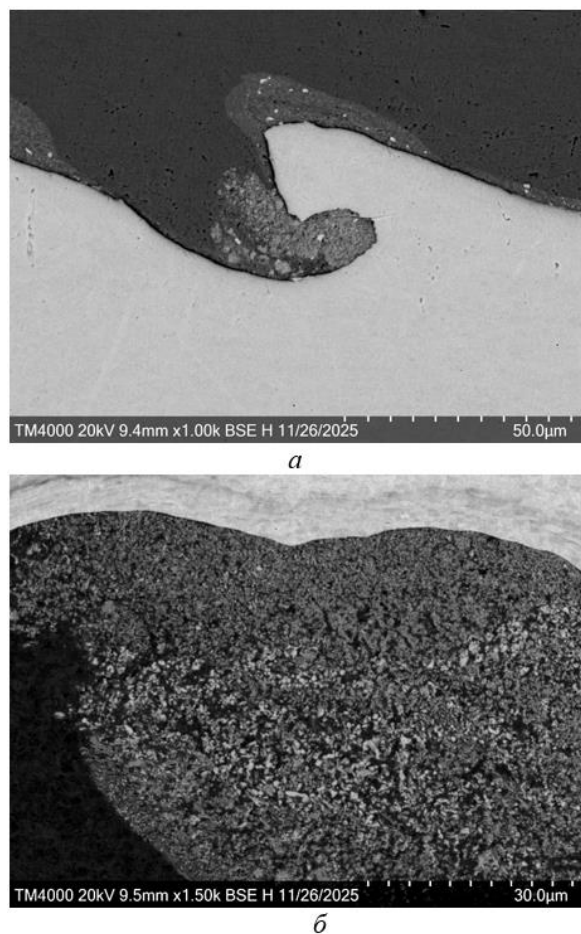


Рис. 3. Электронно-микроскопическое исследование образца Cu–Mo: *а* – переходная зона; *б* – дендриты твердого раствора

Fig. 3. Electron microscopic study of a Cu–Mo sample: *a* – transition zone; *b* – dendrites of the solid solution

В зоне проникновения молибдена в медь видны области различного цвета – над и под «зубцом» молибдена (рис. 3, *а*), но и внутри этих областей различаются дендриты с различными оттенками светлоты, направление распространения которых соответствует потенциальному направлению переноса молибдена. Как было указано, разница в цвете на электронно-

микроскопических изображениях свидетельствует о разнице в составе. В зоне, прилегающей к сформированным в результате сварки взрывом области взаимодействия меди и молибдена с образованием новых фаз плотность светлых дендритов, увеличивается, и они, разветвляясь образуют сети (рис. 3, *б*). Эти линии светлых дендритов, мы трактуем как мезоструктурные каналы массопереноса.

На отдельных участках в зоне контакта меди и молибдена наблюдаются концентрированное проникновение твердых растворов, описанных в работе [10], на основе молибдена в медь на глубины в несколько десятков микрон (рис. 4, *а*) и наблюдаются треки – мезоструктурные каналы массопереноса длиной до сотен микрон (рис. 4, *б*). Это свидетельствует о направленном массопереносе при сварке взрывом.

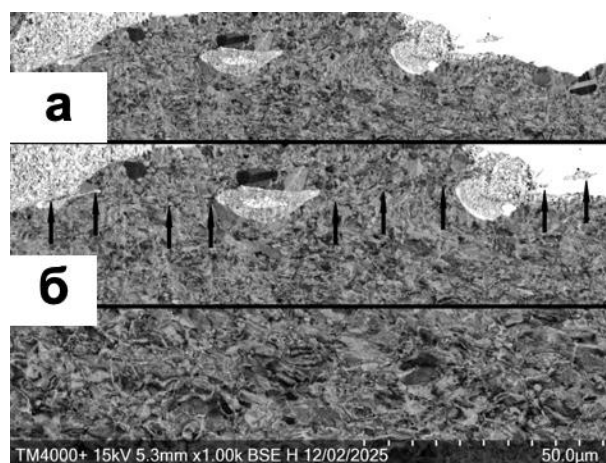


Рис. 4. Изображение, демонстрирующее проникновение молибдена в медь при сварке взрывом: *а* – вклинивание твердых растворов на основе молибдена с частичкой исходного молибдена в медь; *б* – траектория массопереноса (в центре на врезке стрелками показан трек)

Fig. 4. Image demonstrating the penetration of molybdenum into copper during explosion welding: *a* – wedging of solid solutions based on molybdenum with a particle of the original molybdenum into copper; *b* – mass transfer trajectory (the track is shown by arrows in the center of the inset)

Обсуждение результатов

Известно, что нерастворимые в равновесных условиях металлы, под действием динамических нагрузок, могут иметь достаточно широкую область растворимости [14, 15]. Динамические нагрузки создают неравновесные

условия. Такие условия описываются неравновесной термодинамикой и, в частности, теорией локальных равновесий. В этой теории интенсивные переменные, т.е. температура, давление и концентрация являются функциями координат и времени. Соответственно экстенсивные переменные: энтропия, внутренняя энергия, масса описываются своими плотностями. Такое неравновесное состояние системы называется возбужденным.

Любое неравновесное состояние может характеризоваться временем его релаксации. В процессе релаксации возможно появление самоорганизующихся структур или новых фаз.

В работе С. Н. Журкова [16] дано время релаксации металлических сплавов τ в зависимости от температуры, механических нагрузок, а также от энергии активации релаксации, которая связана с химическим составом сплава:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma' \sigma}{RT}$$

где U_0 – начальная энергия активации (E_a); γ' – структурно-чувствительная константа материала (свободный объем); σ – механическое напряжение; τ_0 – предэкспоненциальный множитель, равный по порядку величины периоду тепловых колебаний атомов; T – температура; $R = kN_A$; где N_A – число Авогадро; k – постоянная Больцмана.

Полученные экспериментальные данные в работе анализируются с позиции долговечности материалов τ .

В своих работах Л. Такас [17], анализируя уравнения С. Н. Журкова выделил вклад механических напряжений в процесс структурообразования. Он определил, что при высоких температурах релаксация структуры описывается формулой Аррениуса, т.е. при $\gamma' \sigma \ll E_a$, процесс описывается уравнением:

$$\tau(T) = A \exp \left(\frac{E_a}{RT} \right)$$

где A – коэффициент характеризующий частоту столкновений реагирующих молекул [17].

В случае же низких температур и высоких давлений когда $\gamma' \sigma \geq E_a$ процесс структурной релаксации сводится к чисто механохимическому процессу [17].

Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц [18] рассматривали проблемы очень вязких жидкостей и хрупких твердых тел. Ими показано, что при частотах приложения напряжения порядка $\omega \sim$

$1/\tau$ должно выполняться равенство $\eta \sim \tau \mu$, где η – это вязкость жидкого состояния, μ – модуль сдвига твердого состояния вещества, τ – время приложения нагрузки. На основании расчетов они пришли к выводу, что при больших скоростях приложения нагрузки, хрупкое твердое тело может вести себя как вязкая жидкость.

Дж. С. Лангер с соавторами [19] рассматривали неравновесные процессы с помощью теории локальных равновесий с привлечением методов молекулярной динамики. Им удалось показать, что макроскопическая деформация является результатом микроскопических сдвигов за счет кооперативного движения атомов в мезоскопических областях. Ими предложена модель перестройки групп атомов при низких температурах. Механизм, обеспечивающий такую перестройку – это движение сдвиговой трансформационной зоны. Предложенная модель названа супер-Аррениусовской релаксацией.

Таким образом, Дж. С. Лангер фактически объединил модель С. Н. Журкова, модель Ландау-Лившица и Такаса-Аррениуса. Если у С. Н. Журкова время релаксации соответствует периоду тепловых колебаний решетки, то в модели Дж. С. Лангера это время соответствует времени переключения химических связей с вероятностью:

$$R_{\pm} = R_0 e^{\frac{\pm \alpha \sigma}{P}}$$

где $R_{\pm}$ – вероятность переключения химических связей в двух противоположных направлениях, R_0 – коэффициент, который становится равным $R_{\pm}$, если α – коэффициент внутреннего трения становится равным нулю, σ – локальная нагрузка, P – внешнее давление.

Из модели следует, что структурообразование в неравновесных материалах при низких значениях температуры и высоких значениях давления может происходить как релаксация. Свободное движение атомов может быть реализовано за счет преодоления активационного барьера в результате большого градиента давления в локализованных областях. Продвижение сдвиговой трансформационной зоны может приводить к расширению области растворимости практически нерастворимых компонентов и к образованию новых фаз. Именно это и наблюдается в рассматриваемом эксперименте (табл. 1) [10].

Согласно работе [20], авторов М. Д. Старостенков, А. В. Маркидонов, Т. А. Тихонова, скорость продвижения краудионных кластеров может превышать в 1,5-2 раза скорость звука в металле.

Следует обратить особое внимание на роль свободного объема, который С. Н. Журковым определен как некоторый структурно-чувствительный параметр γ' . В работах, [19, 21] свободный объем определяется как активационный объем, необходимый для смещения атома на критическое расстояние, при достижении которого происходит переключение химической связи. В результате большого свободного объема и больших давлений (например, при сварке взрывом) должно происходить либо образование новой фазы, либо расширение области растворимости нерастворимых компонентов.

В этой связи необходимо прояснить принципиальный вопрос – почему в эксперименте наблюдается активное проникновение молибдена в медь, но не меди в молибден. Это объясняется большим коэффициентом всестороннего сжатия молибдена, который составляя 261-273 ГПа [22, 23] в два раза превышает соответствующие показатели меди (130-140 ГПа) [24, 25]

При рассмотрении области фазообразования на вершинах и в углублениях молибденовых выступов (рис. 3, б) можно отчетливо увидеть дендритоподобные образования. Хорошо известно, что дендриты вообще растут преимущественно в неравновесных условиях (которым отвечает сварка взрывом). Форма, расположение, и разветвленность дендритов наводят на мысль о своеобразном «выпрыскивании» молибдена в медь в виде фрактально разветвляющихся на концах «деревьев». На отдельных участках наблюдаются не просто дендриты, а крупные вихреобразные включения молибдена в медь (рис. 4). Для формирования таких образований необходимы локализованные каналы для массопереноса. Треки от подобных каналов можно наблюдать в микроструктуре, на рис. 4, б показан трек от такого канала, в котором зафиксировано обогащенное молибденом образование (в центре трека на рис 4, б). Видно, начальная и конечная области канала, и ясно что мы наблюдаем эффект «замороженного» сброса давления массопереноса.

Образование подобного трека можно объяснить необходимостью формирования каналов массопереноса молибдена в жестких условиях

больших давлений и кратких времен, вызванных сваркой взрывом. Известен эффект перемещения атомов в твердых телах на макроскопические расстояния за чрезвычайно короткое время, если сравнивать это явление с диффузией [8]. Он был назван аномальным массопереносом за сверхвысокие скорости миграции атомов, порой превосходящие подвижность в жидких металлах. Было обнаружено, что данный эффект проявляется в условиях различных видов внешних воздействий, в том числе при упругой и пластической деформации. В условиях нелинейности развития пластической деформации, а также при её локализации в определенной части образца, она является необходимым условием для проявления термодинамической движущей силы, которая обеспечивает ускоренный массоперенос [26, 27]. Для массопереноса, вызванного пластической деформацией, важную роль играет кривизна кристаллической решетки и возникновение новых разрешенных структурных состояний [8]. Подобные структурные состояния обсуждаются в работе [28] и названы межзельные бифуркационные структурные состояния. По сути – это атермические вакансии, которые возникают в зонах локальной кривизны кристаллической решетки. Напряжение в кристалле создаёт зоны кривизны кристаллической решетки, в которых есть сопряжение увеличенных межатомных расстояний. Происходит перераспределение электронного газа в зонах кривизны, где возрастают межзонные расстояния и возникают атермические вакансии, которых нет в стабильном кристалле. Межзельные бифуркационные структурные состояния позволяют увеличить взаимную растворимость разнородных металлов, формироваться метастабильным фазам и атомно-упорядоченным структурам за короткое время.

Выводы

Показано, что при сварке взрывом молибдена и меди происходит самоорганизация структуры на различных масштабных уровнях. Обнаружено возникновение при совместной пластической деформации разнородных металлов аномально быстрого массопереноса и образования новых фаз, что подтверждается исследованиями, проведенными методами электронной микроскопии. Нелинейность развития пластической деформации в локализованных областях приводит к релаксации структурных со-

стояний: на крупномасштабном уровне – поверхности свариваемых взрывом пластин в виде характерного рельефа зоны контакта медь-молибден; на микромасштабном – изменением зеренной структуры, формированием дендритов и каналов массопереноса; на атомно-кристаллическом – образованием твердых растворов нерастворимых в обычных условиях компонентов, путем, в том числе, возникновения локальной кривизны кристаллической решетки и возникновения потоков атермических вакансий и вещества.

Список литературы

1. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом – М.: Машиностроение–1, 2005.
2. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом — Новосибирск: Наука, 1972.
3. Оглезнева С. А., Доливец О. В. Исследование структуры и свойств электродов-инструментов из Псевдосплавов на основе меди // Master's Journal. – 2014. – № 2. – С. 25-33.
4. Пиатти Дж. Достижения в области композиционных материалов – Москва: Металлургия, 1982.
5. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под ред. Н.П. Лякишева. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1997.
6. Кербер М. Л. Композиционные материалы // Соросовский Образовательный Журнал. – 1999. – №5. – С. 33–41
7. Бутягин П. Ю. Физические и химические пути релаксации упругой энергии в твердых телах. Механохимические реакции в двухкомпонентных системах // Механохимический синтез в неорганической химии: сб. науч. тр. – Новосибирск: Наука. – 1991. – С. 32–52.
8. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Солитоны кривизны как обобщенные волновые структурные носители пластической деформации и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. – № 3. – С. 7–26.
9. Болдырев В. В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // Успехи химии. – 2006. – Т. 75. – № 3. – С. 203–216.
10. Investigation of the Processes of Structure Formation during Explosion Welding of Copper and Molybdenum / F. M. Noskov, L. I. Kveglis, V. I. Mali [et al.] // Crystals. – 2023. – Vol. 13, No. 10. – DOI 10.3390/cryst13101514.
11. 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. – V.311-313. – P. 236-239. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.311-313.236
12. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / [Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П. и др.]. 1. — 1984. — 303 с.
13. Исследование процессов структурообразования при сварке взрывом меди и молибдена / П. О. Шалаев, Л. И. Квеглис, Ф. М. Носков, Т. В. Фадеев // Известия Алтайского государственного университета. – 2023. – № 1(129). – С. 72-76. – DOI 10.14258/izvasu(2023)1-11.
14. Григорьева Т.Ф., Баринаева А.П., Ляхов Н.З. Механохимический синтез в металлических системах. Новосибирск: Параллель, 2008. 312 с.
15. Sauvage, X Mechanical alloying of Cu and Fe induced by severe plastic deformation of a Cu-Fe composite /Acta Materialia vol. 53 (2005) p. 2127-2135
16. S. N. Zhurkov, Kinetic concept of the strength of solids // International Journal of Fracture Mechanics. — 1965. — Vol. 1, № 4. — P. 311–323.
17. Takacs L. Mechanochemistry and the Other Branches of Chemistry: Similarities and Differences // Acta Physica Polonica A. — 2012. — Vol. 121, No. 3. — P. 711–714.
18. Ландау, Л.Д. Теория упругости // Л.Д. Ландау, Е.М.Лифшиц – М.:Наука, 1965, -202 с.
19. Falk M.L., Langer J.S., Shear transformation zone theory elasto-plastic transition in amorphous solids // Phys. Rev. 1998, V. E57, P. 7192-7204.
20. Старостенков, М. Д. Высокоскоростной массоперенос в кристалле при наличии различных конфигураций точечных дефектов / М. Д. Старостенков, А. В. Маркидонов, Т. А. Тихонова // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2009. – Т. 6, № 1. – С. 12-15.
21. Сандитов Д. С. Условие стеклования жидкостей и критерий плавления Линдемана в модели возбужденных атомов // ДАН. 2003. Т. 390. № 2. С. 209–213.
22. Walzer U. Elastic and Bonding Properties of Transition Metals // Physica Status Solidi (b). 1984. Т. 125, № 1. С. 55–64 DOI: 10.1002/pssb.2221250104

23. Górecki T. The relations between the shear modulus, the bulk modulus and young's modulus for polycrystalline metallic elements // *Materials Science and Engineering*. 1980. T. 43, № 3. С. 225–230
24. Gerward L. The bulk modulus and its pressure derivative for 18 metals // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1985. T. 46, № 8. С. 925–927 DOI: 10.1016/0022-3697(85)90095-2
25. Siebke W. Considerations on the bulk modulus of pure metals // *Physica Status Solidi (a)*. 1981. T. 64, № 2. С. 577–583 DOI: 10.1002/pssa.2210640222.
26. Миронова О. А. Характеристики ускоренного массопереноса при ударном сжатии металлов с кубической решеткой: дис. канд. физ.-мат. наук / Ин-т металлофизики им. Курдюмова. – М., 2008.
27. Носков Ф. М. Структурообразование зон локализации пластической деформации в сплавах 3d-переходных металлов как результат быстропротекающих процессов : дис. д-ра тех. наук / Сибирский фед.-ый ун-т. – Новокузнецк, 2018.
28. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Основы физической мезомеханики пластической деформации и разрушения твердых тел как нелинейных иерархически организованных систем // *Физическая мезомеханика* – 2015. – Т. 18. – № 5. – С. 100–113.
2. Deribas, A. A. (1972). *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Physics of hardening and explosion welding]. Nauka.
3. Oglezneva, S. A., & Dolivets, O. V. (2014). *Issledovanie struktury i svoystv elektrodov-instrumentov iz psevdospLavov na osnove medi* [Investigation of the structure and properties of electrode-tools made of copper-based pseudalloys]. *Master's Journal*, 2(2), 25–33.
4. Piaty, Dzh. (1982). *Dostizheniya v oblasti kompozitsionnykh materialov* [Advances in composite materials]. *Metallurgiya*.
5. Lyakishev, N. P. (Ed.). (1997). *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskiykh sistem: spravochnik: v 3 t.* [Phase diagrams of binary metallic systems: reference book: in 3 vols.], Vol. 2. Mashinostroenie.
6. Kerber, M. L. (1999). *Kompozitsionnye materialy* [Composite materials]. *Sorosovskii Obrazovatel'nyi Zhurnal*, 5, 33–41.
7. Butyagin, P. Yu. (1991). *Fizicheskie i khimicheskie puti relaksatsii uprugoi energii v tverdykh telakh. Mekhanokhimicheskie reaktsii v dvukhkompontnykh sistemakh* [Physical and chemical pathways of elastic energy relaxation in solids. Mechanochemical reactions in two-component systems]. In *Mekhanokhimicheskii sintez v neorganicheskoi khimii* [Mechanochemical synthesis in inorganic chemistry] (pp. 32–52). Nauka.
8. Panin, V. E., & Egorushkin, V. E. (2013). *Solitony krivizny kak obobshchennyye volnovye strukturnyye nositeli plasticheskoi deformatsii i razrusheniya* [Curvature solitons as generalized wave structural carriers of plastic deformation and fracture]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 16(3), 7–26.
9. Boldyrev, V. V. (2006). *Mekhanokhimiya i mekhanicheskaya aktivatsiya tverdykh veshchestv* [Mechanochemistry and mechanical activation of solids]. *Uspekhi khimii*, 75(3), 203–216.
10. Noskov, F. M., Kveglis, L. I., Mali, V. I., et al. (2023). Investigation of the processes of structure formation during explosion welding of copper and molybdenum. *Crystals*, 13(10).
11. Mali, V. I., Pavliukova, D. V., Bataev, I. A., Bataev, A. A., Smirnov, A. A., Yrtsev, P. S., & Bazarkina, V. V. (2011). Formation of the intermetallic layers in Ti-Al multilayer composites. *Advanced Materials Research*, 311–313, 236–239.
12. Goldstein, J., Newbury, D., Echlin, P., Joy, D., Lifshin, E., & Fiori, C. (1984). *Rastrovaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenovskiy mikroanaliz* [Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis] (Vol. 1, R. S. Gvozdover & L. F. Komolova, Trans.). Mir. (Original work published 1981)
13. Shalaev, P. O., Kveglis, L. I., Noskov, F. M., & Fadeev, T. V. (2023). *Issledovanie*

Информация об авторах

М. Б. Лесков – аспирант, Сибирский федеральный университет, 89233035682

Л. И. Квеглис – доктор физико-математических наук, профессор, Сибирский федеральный университет, 89607664152

Ф. М. Носков – доктор технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет,

А. Г. Анисимов – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,

М. Н. Волочаев – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт физики им. Киренского СО РАН, 89607745549

References

1. Lysak, V. I., & Kuz'min, S. V. (2005). *Svarka vzryvom* [Explosion welding]. *Mashinostroenie*–1.
2. Deribas, A. A. (1972). *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Physics of hardening and explosion welding]. Nauka.
3. Oglezneva, S. A., & Dolivets, O. V. (2014). *Issledovanie struktury i svoystv elektrodov-instrumentov iz psevdospLavov na osnove medi* [Investigation of the structure and properties of electrode-tools made of copper-based pseudalloys]. *Master's Journal*, 2(2), 25–33.
4. Piaty, Dzh. (1982). *Dostizheniya v oblasti kompozitsionnykh materialov* [Advances in composite materials]. *Metallurgiya*.
5. Lyakishev, N. P. (Ed.). (1997). *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskiykh sistem: spravochnik: v 3 t.* [Phase diagrams of binary metallic systems: reference book: in 3 vols.], Vol. 2. Mashinostroenie.
6. Kerber, M. L. (1999). *Kompozitsionnye materialy* [Composite materials]. *Sorosovskii Obrazovatel'nyi Zhurnal*, 5, 33–41.
7. Butyagin, P. Yu. (1991). *Fizicheskie i khimicheskie puti relaksatsii uprugoi energii v tverdykh telakh. Mekhanokhimicheskie reaktsii v dvukhkompontnykh sistemakh* [Physical and chemical pathways of elastic energy relaxation in solids. Mechanochemical reactions in two-component systems]. In *Mekhanokhimicheskii sintez v neorganicheskoi khimii* [Mechanochemical synthesis in inorganic chemistry] (pp. 32–52). Nauka.
8. Panin, V. E., & Egorushkin, V. E. (2013). *Solitony krivizny kak obobshchennyye volnovye strukturnyye nositeli plasticheskoi deformatsii i razrusheniya* [Curvature solitons as generalized wave structural carriers of plastic deformation and fracture]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 16(3), 7–26.
9. Boldyrev, V. V. (2006). *Mekhanokhimiya i mekhanicheskaya aktivatsiya tverdykh veshchestv* [Mechanochemistry and mechanical activation of solids]. *Uspekhi khimii*, 75(3), 203–216.
10. Noskov, F. M., Kveglis, L. I., Mali, V. I., et al. (2023). Investigation of the processes of structure formation during explosion welding of copper and molybdenum. *Crystals*, 13(10).
11. Mali, V. I., Pavliukova, D. V., Bataev, I. A., Bataev, A. A., Smirnov, A. A., Yrtsev, P. S., & Bazarkina, V. V. (2011). Formation of the intermetallic layers in Ti-Al multilayer composites. *Advanced Materials Research*, 311–313, 236–239.
12. Goldstein, J., Newbury, D., Echlin, P., Joy, D., Lifshin, E., & Fiori, C. (1984). *Rastrovaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenovskiy mikroanaliz* [Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis] (Vol. 1, R. S. Gvozdover & L. F. Komolova, Trans.). Mir. (Original work published 1981)
13. Shalaev, P. O., Kveglis, L. I., Noskov, F. M., & Fadeev, T. V. (2023). *Issledovanie*

protseessov strukturoobrazovaniya pri svarke vzryvom medi i molibdena [Investigation of structure formation processes during explosion welding of copper and molybdenum]. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*, 1(129), 72–76.

14. Grigor'eva, T. F., Barinova, A. P., & Lyakhov, N. Z. (2008). *Mekhanokhimicheskii sintez v metallicheskih sistemakh* [Mechanochemical synthesis in metallic systems]. *Parallel'*.

15. Sauvage, X. (2005). Mechanical alloying of Cu and Fe induced by severe plastic deformation of a Cu-Fe composite. *Acta Materialia*, 53, 2127–2135.

16. Zhurkov, S. N. (1965). Kinetic concept of the strength of solids. *International Journal of Fracture Mechanics*, 1(4), 311–323.

17. Takacs, L. (2012). Mechanochemistry and the other branches of chemistry: Similarities and differences. *Acta Physica Polonica A*, 121(3), 711–714.

18. Landau, L. D., & Lifshits, E. M. (1965). *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Nauka.

19. Falk, M. L., & Langer, J. S. (1998). Shear transformation zone theory of the elastoplastic transition in amorphous solids. *Physical Review E*, 57, 7192–7204.

20. Starostenkov, M. D., Markidonov, A. V., & Tikhonova, T. A. (2009). Vysokoskorostnoi massoperenos v kristalle pri nalichii razlichnykh konfiguratsii tochechnykh defektov [High-speed mass transfer in a crystal with various configurations of point defects]. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 6(1), 12–15.

21. Sanditov, D. S. (2003). Uslovie steklovaniya zhidkostei i kriterii plavleniya Lindemana v modeli vozbuzhdennykh atomov [The condition of glass formation of liquids and the Lindemann melting criterion in the excited atom model]. *Doklady Akademii Nauk*, 390(2), 209–213.

22. Walzer, U. (1984). Elastic and bonding properties of transition metals. *Physica Status Solidi (b)*, 125(1), 55–64.

23. Górecki, T. (1980). The relations between the shear modulus, the bulk modulus and Young's modulus for polycrystalline metallic elements. *Materials Science and Engineering*, 43(3), 225–230.

24. Gerward, L. (1985). The bulk modulus and

its pressure derivative for 18 metals. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 46(8), 925–927.

25. Siebke, W. (1981). Considerations on the bulk modulus of pure metals. *Physica Status Solidi (a)*, 64(2), 577–583.

26. Mironova, O. A. (2008). *Kharakteristiki uskorenno massoperenosa pri udarnom szhatii metallov s kubicheskoi reshetkoi* [Characteristics of accelerated mass transfer under shock compression of metals with a cubic lattice] (Doctoral dissertation). Institut metallofiziki im. Kurdyumova.

27. Noskov, F. M. (2018). *Strukturoobrazovanie zon lokalizatsii plasticheskoi deformatsii v splavakh 3d-perekhodnykh metallov kak rezul'tat bystroprotekayushchikh protseessov* [Structure formation of plastic deformation localization zones in alloys of 3d transition metals as a result of fast processes] (Doctoral dissertation). Sibirskii federal'nyi universitet.

28. Panin, V. E., & Egorushkin, V. E. (2015). *Osnovy fizicheskoi mezomekhaniki plasticheskoi deformatsii i razrusheniya tverdykh tel kak nelineynykh ierarhicheskii organizovannykh sistem* [Fundamentals of physical mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids as nonlinear hierarchically organized systems]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 18(5), 100–113.

Information about the authors

M. B. Leskov – Postgraduate Student, Siberian Federal University, 89233035682

L. I. Kveglis – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Siberian Federal University, 89607664152

F. M. Noskov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian Federal University

A. G. Anisimov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

M. N. Volochaev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 16.06.2026; одобрена после рецензирования 07.09.2026; принята к публикации 14.09.2026.

The article was received by the editorial board on 16 Jun. 2026; approved after reviewing 07 Sep. 2026; accepted for publication 14 Sep. 2026.