3. Yongqing Fu, Hejun Du, Sam Zhang. Deposition of TiN layer on TiNi thin films to improve surface properties. Surface and Coatings Technology. 2003. Vol. 167. Pp. 129 – 136.

4. Gjunter V.Ye., Mirgazizov M.Z. *Rossiyskiy vestnik dental'noy implantologii*. 2004. № 1. Pp. 52 – 56.

5. Starosvetsky D. and Gotman I. Corrosion behavior of titanium nitride coated Ni – Ti shape memory surgical alloy. Biomaterials. 2001. Vol. 22. Pp. 1853 – 1859.

6. Beliy A.V., Karpenko G.D., Mishkin N.K. *Struktura i metody formirovaniya iznosostoykih poverkhnostnykh sloev* (Structure and methods of forming wear-resistant layers poverhnostnyih). Moscow: Mashinostroenie, 1991. 320 p.

7. Andreev A.A., Kostyuk G.I., Minaev N.A. – *V kn.: sb. nauch. tr. Vestnik Nacional'nogo tehnicheskogo universiteta «HPI»*. Har'kov: 2011. 340 p.

8. Tabakov V.P., Chihranov A.V. *Izvestina Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk.* 2010. Vol. 12. № 4. Pp. 292 – 297.

9. Andreev A.A., Grigor'ev S.N., Gorban'V.F. etc. *Vestnik MGTU «Stankin»*. 2010. № 3 (11). Pp. 14 – 17.

10. Sanders J.O., Sanders E.A., More R., Ashman R.B. A preliminary investigation of shape memory alloy in the surgical correction of scoliosis. Spine. 1993. Vol. 18. Pp. 1640 – 1646.

11. Nash R., Iaganth C.S. The Ni – Zr System. Bull. Of Alloy Phase Diagrams. 1984. Vol. 5. № 2. Pp. 144 – 148.

12. Dixon T. K. Kwok, Martin Schulz, Tao Hu, Chenglin Chu and Paul Chu. Surface Treatments of Nearly Equiatomic NiTi Alloy (Nitinol) for Surgical Implants. Biomedical Engineering. Trends in Materials Science. Mr Anthony Laskovski (Ed.) – 2011. ISBN: 978-953-307-513-6. InTech.

13. Bull S.J. Nanoindentation of coatings. J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38. Pp. 393 – 413.

14. Bykov Yu.A., Karpuhin S.D. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal*. 2003. № 10. Pp. 26 – 28.

15. Kolmakov A.G., Golovin Yu.I., Terent'ev V.F., Bakirov M.B. *Metody opredelenija tverdosti metallicheskih materialov* (Methods for determination of hardness of metallic materials). Voronezh: izd. Voronezhskogo gos. un-ta, 2000. 80 p.

16. Trahtenberg I.Sh., Vladimirov A.B., Yugov V.A. etc. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2005. Vol. 99. № 6. Pp. 103 – 107.

17. Tuck J.R., Korsunsky A.M., Bhat D.G., Bull S.J. Indentation hardness evaluation of cathodic arc deposited thin hard coatings. Surface and Coatings Technology. 2001. Vol. 139. Pp. 63 – 74.

18. Korsunsky A.M., McGurk M.R., Bull S.J., Page T.F. The effect of creep on the residual stress in vapour deposited thin films. Surface and Coatings Technology. 1998. Vol. 99. Pp. 171.

19. Tarasenko Yu.P., Careva I.N., Romanov I.G. *Izv. Akademii nauk. Ser. fizicheskaja.* 2002. Vol. 66. № 8. Pp. 1223 – 1225.

20. Bykov Yu.A., Karpukhin S.D., Boychenko M.K., Cheptsov V.O. *Sposob opredeleniya tverdosti pokrytiya* (Method of determining the hardness of the coating). Patent RF № 2222801. 2004.

Received May 20, 2013

УДК 539.213.536

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНЕ КОНТАКТА МЕТАЛЛОВ СО СЛАБОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ*

У.А. Рахимова*[1], *аспирант, ст. преподаватель
Л.И. Квеглис*[2], *д.ф.-м.н., профессор
Ф.М. Носков*[2], *к.т.н., доцент
Я.В. Отнюков*[2], *аспирант
А.А. Калитова*[1], *аспирант

[1] Восточно-Казахстанский государственный университет (Усть-Каменогорск, Казахстан)
[2] Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

Аннотация. Исследованы процессы структурообразования в зоне контакта практически нерастворимых друг в друге металлов (Cu – Pb, Fe – Cu) при различных условиях пластической деформации. Обнаружено, что при взаимодействии твердофазных образцов свинца и меди, железа и меди, подвергнутых совместной осадке, могут формироваться продукты механохимических реакций, имеющие структуру, отличную от структуры исходных компонентов. В случае взаимодействия кумулятивной медной струи со стальным стержнем происходит образование твердых растворов замещения. Получены новые фазы как результат прохождения механохимических реакций. Показано, что множество моделей структурообразования в градиентных условиях могут быть объединены в рамках моделей структурной самоорганизации в волнах пластической деформации.

Ключевые слова: ограниченная растворимость, структурообразование, пластическая деформация, твердофазная реакция, механохимическая реакция, энергия активации.

E-mail: kveglis@list.ru

Исследование физико-химических процессов, происходящих в зоне контакта свинец – медь, железо – медь при пластической деформации представляет существенный интерес, например, для кабельной промышленности: токопроводящие элементы конструкции кабелей могут быть выполнены из меди, а металлическая оболочка – из свинца или сплавов на основе свинца; система железо – медь используется при производстве биметаллической сталемедной проволоки [1, 2].

* Работа выполнена при поддержке гранта РК № 0112РК02644.

Авторы благодарят Р.Б. Абылкалыкову и В.В. Коваленко за помощь в проведении эксперимента.

Целью настоящей работы явилось исследование продуктов механохимических реакций в зоне контакта образцов свинца и меди, меди и железа при структурообразовании в различных условиях пластической деформации.

В настоящей работе вырезанные в виде пластинок образцы меди и свинца размерами 0,1×10×20 мм совмещали друг с другом, нагревали до температуры 400 °С и в наковальне Бриджмена сдавливали в течение 20 мин. В результате образцы прочно соединялись.

В другом эксперименте соединяли стальной диск с аналогичным медным диском и их подвергали совместному ударному нагружению в паровоздушном молоте. Также стальной стержень был подвергнут воздействию кумулятивной струи, полученной при взрыве медного кумулятивного снаряда (методика описана в работе [3]).

Поверхности и состав разделенных медного и свинцового образцов, стального и медного дисков, а также структуру и состав образцов, получившихся при взаимодействии кумулятивной струи со стержнем, исследовали на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV с микроанализатором. Фазовый состав всех образцов определяли методом дифракции рентгеновских лучей на дифрактометре «Bruker».

Предел растворимости свинца в меди согласно фазовой диаграмме при температуре 400 °С не превышает 0,09 % (ат.), а растворимость меди в свинце не превышает 0,023 % (ат.) [4].

В ходе экспериментов в наковальне Бриджмена проходила механохимическая реакция, в результате пластинки меди прочно соединялись с пластинками свинца (после проведения эксперимента свинцовую пластинку отрывали от медной). Для исследования продуктов механохимических реакций проведены исследования химического состава и микроструктуры на поверхности контакта.

На рис. 1 приведено полученное на сканирующем электронном микроскопе изображение пластинки меди. До осадки пластинки были отполированы. После прохождения твердофазного взаимодействия поверхности

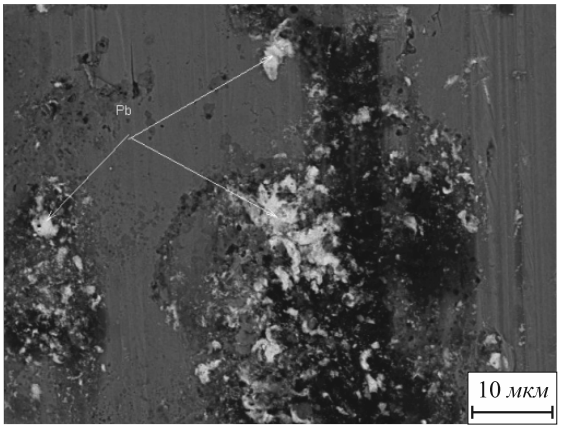

Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение поверхности медной пластинки после механохимической реакции

становятся шероховатыми и неоднородными. В точках, показанных на рис. 1, наблюдается следующий химический состав: 28,7 % Cu, 71,3 % Pb.

На рис. 2 приведен энергодисперсионный спектр поверхности свинцовой пластинки после твердофазной реакции: на свинцовой пластинке зафиксировано значительное количество меди. На аналогичных рентгеновских спектрах, снятых с поверхности медной пластинки, в достаточно большом количестве выявлен свинец.

На рис. 3 представлена расшифровка рентгенограммы на базе данных ISTM (карта № 00-046-1037), из которой видно, что пластическая деформация способствовала протеканию механохимической реакции свинца с медью. Слева от рефлекса $(111)_{Pb}$ в области малых углов видны дополнительные рефлексы, которые отсутствуют на картине, полученной от чистого свинца. Это свидетельствует об образовании новых фаз, не определенных таблицами ISTM.

В другом эксперименте [5] при совместной пластической деформации медного и стального дисков возникли зоны точечного контакта со значительным удельным давлением. Эти зоны сформированы за счет микрошероховатости образцов. На энергодисперсионном спектре, снятом с неоднородности на железном диске, обнаружено, что в зоне неоднородности присутствует медь в количестве до 53,3 %. Это может свидетельствовать о прошедшей твердофаз-

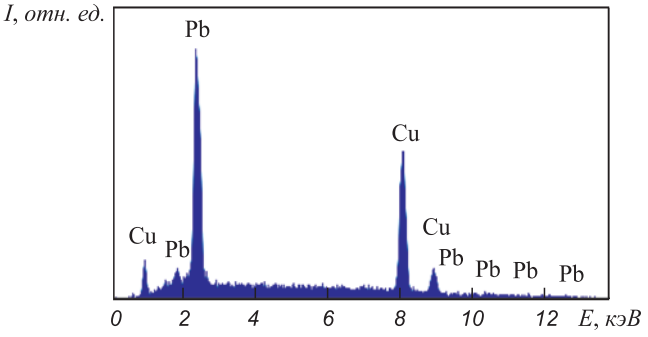

Рис 2. Энергодисперсионный спектр поверхности свинцовой пластинки

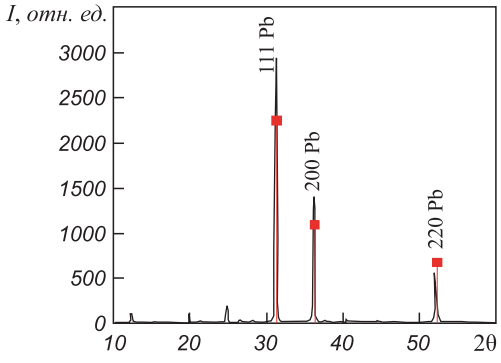

Рис. 3. Картина рентгеновской дифракции, полученная с поверхности свинцовой пластинки (рефлексы свинца взяты по таблицам ISTM)

ной реакции. Результаты исследований химического состава поверхности медного диска показали, что неоднородности на его поверхности значительно обогащены железом.

С целью выяснения возможности прохождения твердофазной реакции между медным и стальным образцами обе поверхности подвергли рентгеновскому фазовому анализу. Рентгенограмма, полученная с поверхности медного образца, приведена на рис. 4 (красными квадратиками показаны табличные значения рефлексов чистой меди, которую выбрали в качестве эталона).

Анализ интенсивностей рефлексов дифракции рентгеновских лучей свидетельствует о возникновении текстуры с осью зоны [200]. Рефлекс от плоскостей (111), который должен быть самым интенсивным (эталонные значения), имеет интенсивность меньшую (рис. 4), чем рефлекс от плоскостей (200) [5]. Такое перераспределение возможно, когда под действием механической нагрузки зерна испытывают деформацию по схеме сдвиг–поворот [6], которая приводит к возникновению текстуры.

Также обнаружено, что наряду с ГЦК решеткой, соответствующей меди, появились рефлексы новых фаз (слева от рефлекса (111), не зафиксированные в таблицах ASTM.

Исследование полученных в кумулятивной струе образцов показало, что взаимодействие кумулятивной струи меди с твердой сталью в условиях высокого давления привело к существенному повышению растворимости железа в меди и меди в железе. Показатели растворимости многократно превысили возможные величины, соответствующие фазовой диаграмме.

В качестве рабочей гипотезы рассматривали возможность образования новых фаз в экстремальных условиях за счет большой диффузионной подвижности атомов меди и железа в кумулятивной струе. В работе [5] было обнаружено расширение области твердых растворов меди в железе и железа в меди, что отличается от фазовой диаграммы равновесий. Однако образования химических соединений железа с медью

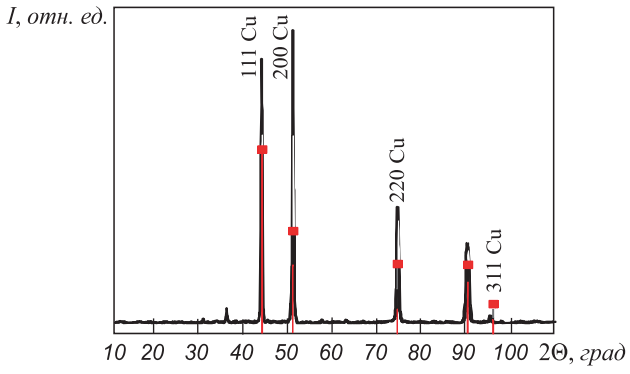

Рис. 4. Совмещенная картина рентгеновской дифракции, полученная со стенок полости стержня (*1*), от затвердевшей капли из кумулятивной струи (*2*) и и рефлексы меди (■), взятые из таблиц ASTM [5]

в кумулятивной струе, несмотря на большие давления, не произошло.

В эксперименте с пластинами свинца и меди, а также с дисками меди и железа, несмотря на значительно меньшие давления, произошла механохимическая реакция с образованием новых соединений.

При рассмотрении структуры, реакционной способности и свойств соединений используется понятие «химическая связь». Изучение общих правил образования химических связей основывается на методе молекулярных орбиталей, в котором используется квантовомеханический подход для объяснения существования связующей и разрыхляющей орбиталей при описании внутримолекулярного межатомного взаимодействия. Диаграмма энергетических уровней для простейших систем сводится к существованию орбитали свободного атома, орбиталей связывающей и разрыхляющей для двухатомной молекулы. Связывающая орбиталь располагается ниже по значению энергии, чем разрыхляющие орбитали и орбитали свободного атома [7].

Согласно теории Гилмана [8] общий механизм механохимической реакции может быть объяснен с помощью метода молекулярных орбиталей. Так, деформации сдвига вызывают увеличение энергии связывающих орбиталей и уменьшение энергии разрыхляющих орбиталей. Это уменьшает размер энергетического промежутка в спектре энергии связи и таким образом дестабилизирует систему. Когда энергетический промежуток становится равным нулю, электроны связи становятся делокализованными, потому что могут перейти на разрыхляющую орбиталь, не расходуя энергии. Таким образом, материал становится очень реактивным (другими словами энергия активации реакции обращается в нуль). Ответ на вопрос о том, каков будет продукт реакции, зависит не только от энергии активации, но и от геометрического фактора, который определяется расстояниями между атомами и углами между направлениями химических связей.

В кумулятивной струе реализуется ситуация, когда атомы свободно перемещаются, находясь в жидкой фазе в так называемом надбарьерном состоянии. Согласно данным Я.Б. Зельдовича [9] в таком надбарьерном состоянии, когда энергия, переданная материалу, превышает энергию активации реакции, может происходить свободное переключение химических связей. В жидкости не существует дискретных межатомных расстояний и углов между ними, наблюдается только расширение области растворимости двух практически нерастворимых компонентов – меди и железа. В результате кратковременности приложения нагрузки можно зафиксировать при нормальных условиях неравновесные состояния (железо с ГЦК решеткой).

Ландау и Лившиц [10] рассматривали проблемы очень вязких жидкостей и хрупких твердых тел: при

частотах приложения напряжения порядка $\omega \sim 1/\tau$ должно выполняться соотношение $\eta \sim \tau\mu$, где η – вязкость вещества в жидком состоянии; μ – модуль сдвига вещества в твердом состоянии; τ – время приложения нагрузки. На основании расчетов сделан вывод [10], что при больших скоростях приложения нагрузки хрупкое твердое тело может вести себя как вязкая жидкость. Частота приложения нагрузки в кумулятивной струе достаточна для того, чтобы выполнялось соотношение $\eta \sim \tau\mu$. В эксперименте с дисками это соотношение не выполнялось; образовался продукт твердофазной реакции.

В работе С.Н. Журкова [11] время релаксации металлических сплавов (τ) в зависимости от температуры, механических нагрузок и энергии активации релаксации, которая связана с химическим составом сплава, определяется следующим образом:

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

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; $R = kN_A$; N_A – число Авогадро; k – постоянная Больцмана.

В своей работе Такас [12], анализируя уравнения Журкова, выделил вклад механических напряжений в процесс структурообразования. При высоких температурах (когда $\gamma'\sigma << E_a$) релаксация структуры описывается уравнением Аррениуса

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

где A – коэффициент, характеризующий частоту столкновений реагирующих молекул [12].

В случае низких температур и высоких давлений (когда $\gamma'\sigma \geq E_a$) процесс структурной релаксации сводится к чисто механохимическому процессу [12]. Именно этот случай и соответствует экспериментам с свинцовой и медной пластинками, а также стальным и медным дисками. Процесс твердофазной реакции проходил под давлениями, значительно меньшими, чем реализуемые в кумулятивной струе.

В работе В.В. Болдырева [13] формирование новых фаз объясняется в рамках представлений о взаимодействии в решетке кристаллов пластических волн, вызванных напряжениями. Это приводит к образованию неравновесных состояний в кристаллах и дефектов, которые облегчают разрушение кристалла по определенным направлениям.

На рис. 1 наблюдаются островки новой интерметаллидной фазы с характерной кристаллической решеткой. Любая кристаллическая структура имеет дискретные межатомные расстояния и углы между направлениями химических связей, характерные только для этой фазы. Новую фазу наблюдали на контактирующих поверхностях. Согласно данным В.Е. Панина [14] наименьшую сдвиговую устойчивость в нагруженном твердом теле имеет поверхностный слой; поэтому первичные сдвиги зарождаются на поверхности, генерируя в объем материала все виды деформационных дефектов.

Примером твердофазного превращения может служить мартенситный переход, когда исходная и конечная фазы когерентно связаны между собой. Для получения новой фазы необходимы небольшие изменения межатомных расстояний, а также углов между ними, что обеспечивает минимальную энергию образования мартенсита. Такие изменения межатомных расстояний и углов могут быть реализованы по схеме сдвиг–поворот [14]. Таким образом, для образования новой фазы необходима пластическая деформация, проходящая по схеме сдвиг – поворот. Возникшая при этом комбинация атомов может стать зародышем новой фазы, если она хорошо геометрически адаптирована к исходной матрице. Все другие возможности не реализуются в продукте реакции.

Томпсон Л.М. [15] предложил модель сдвиг–поворот на атомном уровне, рассматривая плотноупакованный кристалл в декартовой системе координат. Кристалл растягивают вдоль оси, при этом допускается, что атомы при деформации остаются в одной и той же плоскости.

В плоскости плотноупакованных атомов приложенное к ней напряжение стремится раздвинуть плотноупакованные цепочки атомов (рис. 5, *а*). При достаточно большом удлинении эти цепочки становятся неустойчивыми по отношению к вращению, так что может возникнуть сдвиговое напряжение, приводящее к повороту (рис. 5, *б*).

Вариантом схемы сдвиг–поворот в мезоскопическом масштабе является так называемая «вращательная диффузия» [16].

Одной из наиболее интересных моделей перемещения атомов под нагрузкой является модель сдвиговой трансформационной зоны, предложенной Лангером [17]. Возникновение и перемещение зоны объясняется возникновением уплотненных и разреженных областей в металле, приводящих к взаимному смещению атомов и их повороту. Удалось показать [17], что макроскопическая деформация является результатом микроскопических сдвигов за счет кооперативного движения атомов в мезоскопических областях. Такое движение осуществляется путем прохождения волны пластической деформации, сопровождающейся переключением химических связей. Вероятность переключения связей определяется по формуле

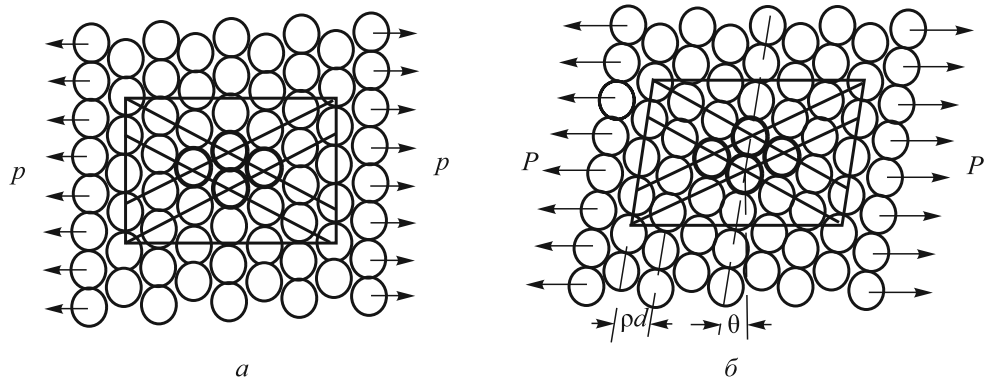

Рис. 5. Плотноупакованный слой атомов в упруго деформированном (*а*) и в пластически деформированном (*б*) состоянии [15]

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

здесь $R_{\pm}$ – вероятность переключения химических связей в двух противоположных направлениях; R_0 – коэффициент, который характеризует вещество; α – коэффициент внутреннего трения; σ – локальная нагрузка в мезоскопической области; P – внешнее давление [17].

Эта зависимость позволяет оценить связь моделей Журкова, Ландау-Лившица и Панина. В модели Журкова время релаксации соответствует периоду тепловых колебаний решетки, в модели Лангера это время соответствует времени переключения химических связей. Локальная нагрузка в мезоскопической области (σ) совпадает со значением σ в уравнении Журкова. Коэффициент внутреннего трения имеет прямое отношение к выражению $\eta \sim \tau\mu$ в модели Ландау–Лившица. Панин рассматривает автоволновой процесс для объяснения корреляций в кооперативном движении атомов, создаваемом автоволнами локализации пластической деформации. В очагах локализации пластической деформации есть вероятность возникновения новой фазы.

Следует отметить, что из всех перечисленных моделей только в работах Томпсона и Панина металл рассматривается как кристаллическое, а не как изотропное твердое тело.

Выводы. Исследованы процессы структурообразования на границе раздела практически нерастворимых друг в друге металлов (Cu–Pb, Fe–Cu) в различных условиях пластической деформации. Обнаружено, что в случае взаимодействия кумулятивной медной струи со стальным стержнем происходит образование твердых растворов замещения на основе ГЦК решеток железа и меди соответственно в более широких областях, чем это возможно по диаграмме фазовых равновесий. Обнаружено, что при взаимодействии твердофазных образцов свинца и меди, а также стали и меди, подвергнутых совместной осадке, могут формироваться продукты механохимических реакций, имеющих структуру, отличную от структуры исходных компонентов. Проанализированы условия возникновения новой фазы как результата прохождения механохимической реакции. Показано, что множество моделей структурообразования в градиентных условиях могут быть объединены в рамках моделей Томпсона и Панина. Анализ условий, необходимых для переключения химических связей, является общим для микро-, мезо- и макромасштабных уровней.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рашников С.Ф., Щербо Ю.А., Ситников И.В. и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2006. № 4. С. 52 – 54.
2. Вдовин К.Н., Кольга М.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2010. № 4. С. 33 – 35.
3. Швецов Г.А., Матросов А.Д. // Прикладная механика и техническая физика. 2004. № 2. С. 147 – 155.
4. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т. 2. / Под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с.
5. Абылкалыкова Р.Б., Кветлис Л.И., Носков Ф.М. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 10. С. 52 – 56.
6. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 2. С. 9 – 30.
7. Бердетт Дж. Химическая связь. – М.: Мир, 2008. – 245 с.
8. Gilman J.J. // Science. 1996. Vol. 274. P. 65.
9. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Физматлит, 2008. – 656 с.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1965. – 202 с.
11. Zhurkov S.N. // Intern. J. Fracture Mech. 1965. № 1. P. 311.
12. Takacs L. // J. Met. 2000. Vol. 52. P. 12.
13. Болдырев В.В., Григорьева Т.Ф., Цыбуля С.В. и др. // Неорганические материалы. 2000. Т. 36. № 2. С. 194 – 200.
14. Панин В.Е. // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. № 3. С. 5 – 22.
15. Томпсон Д.М. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. – М.: Мир, 1985. – 289 с.
16. Joshi S.P., Ramesh K.T. Rotational diffusion and grain size dependent shear instability in nanostructured materials // Acta Materialia. 2008. Vol. 56. P. 282 – 291.
17. Falk M.L., Langer J.S. Shear transformation zone theory elasto-plastic transition in amorphous solids // Phys. Rev. 1998. Vol. E57. P. 7192 – 7204.

© 2014 г. *У.А. Рахимова, Л.И. Квеглис, Ф.М. Носков, Я.В. Отнюков, А.А. Калитова*
Поступила 7 марта 2014 г.

STRUCTURE PECULIARITIES DURING PLASTIC DEFORMATION IN THE CONTACT ZONE OF A METAL WITH A WEAK SOLUBILITY

U.A. Pachimova*[1], *Postgraduate, Senior Lecturer
L.I. Kveglis*[2], *Dr. Eng., Professor
F.M. Noskov*[2], *Cand. Eng., Assist. Professor
Y.V. Otnyukov*[2], *Postgraduate
A.A. Kalitova*[1], *Postgraduate

[1] Eastern Kazakhstan State University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

[2] Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

E-mail: kveglis@list.ru

Abstract. The processes of structurization in the contact region of almost insoluble metals (Cu – Pb, Fe – Cu) under various conditions of plastic deformation were investigated. It was established that during the process of interaction of solid-phase samples of lead and copper, iron and copper, subjected to volume com-pression, the products of mechano-chemical reaction may be formed. They have a structure which is different from the structure of the original components. In the case of the interaction of copper cumulative jet with a steel rod substitutional solid solutions were formed. The new phase was obtained as a result of passage of mechano-chemical reactions. It is shown that a variety of models of structure formation in gradient conditions can be combined within the structural models of self-organization in the waves of plastic deformation.

Keywords: limited solubility, structure formation, plastic deformation, solid-phase reaction, mechano-chemical reaction, activation energy.

REFERENCES

1. Rashnikov S.F., Shcherbo Yu.A., Sitnikov I.V. etc. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*. 2006. № 4. Pp. 52 – 54.

2. Vdovin K.N., Kol'ga M.A. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*. 2010. № 4. Pp. 33 – 35.

3. Shvetsov G.A., Matrosov A.D. *Prikladnaja mehanika i tehnicheskaja fizika*. 2004. № 2. Pp. 147 – 155.

4. *Diagrammy sostojanija dvojnyh metallicheskih sistem. T. 2. / Ed. N.P. Lyakisheva.* (Phase Diagrams of Binary metal systems. Vol. 2). Moscow: Mashinostroenie, 1997. 1024 p.

5. Abylkalykova R.B., Kveglis L.I., Noskov F.M. *Izv. vuz. Cher. metallurgiya*. 2012. № 10. Pp. 52 – 56.

6. Panin V.E., Egorushkin V.E. *Fizicheskaya mezomehanika.* 2008. Vol. 11. № 2. Pp. 9 – 30.

7. Berdett Dzh. *Himicheskaja svjaz'* (Chemical bond). Moscow: Mir, 2008. 245 p.

8. Gilman J.J. Science. 1996. Vol. 274. P. 65.

9. Zel'dovich Ya.B., Rajzer Yu.P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskih yavleniy* (Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena). Moscow: Fizmatlit, 2008. 656 p.

10. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoriya uprugosti* (Theory of elasticity). Moscow: Nauka, 1965. 202 p.

11. Zhurkov S.N. Intern. J. Fracture Mech. 1965. № 1. P. 311.

12. Takacs L. J. Met. 2000. Vol. 52. P. 12.

13. Boldyrev V.V., Grigor'eva T.F., Tsibulya S.V. etc. *Neorganicheskie materialy*. 2000. Vol. 36. № 2. Pp. 194 – 200.

14. Panin V.E. *Fizicheskaja mezomehanika*. 2001. Vol. 4. № 3. Pp. 5 – 22.

15. Tompson D.M. *Neustoychivosti i katastrofi v nauke i tehnike* (Instability and catastrophes in science and technology). Moscow: Mir, 1985. 289 p.

16. Joshi S.P., Ramesh K.T. Rotational diffusion and grain size dependent shear instability in nanostructured materials. Acta Materialia. 2008. Vol. 56. Pp. 282 – 291.

17. Falk M.L., Langer J.S. Shear transformation zone theory elasto-plastic transition in amorphous solids. Phys. Rev. 1998. Vol. E57. Pp. 7192 – 7204.

Received March 7, 2014