

<sup>4</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science Siberian Branch Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia)

E-MAIL: gromov@physics.sibsiu.ru

**Abstract.** The analysis of structure-phase state changes in the low carbon steel during mill scale removing is carried out by methods of optical and transmission electron microscopy. The bands formation with the increased perlite content caused by carbon liquation is noted.

**Keywords:** low-carbon steel, dislocation substructure, phase composition, plastic deformation, scale, density of dislocations.

#### REFERENCES

1. Braunshteyn O.E., Bazaykin V.I., Gromov V.E., Dorofeev V.V. *Proizvodstvo listovogo prokata v valkah peremennogo secheniya* (Production of flat rolled steel in beams of variable section). Novokuzneck: izd. SibGIU, 2008. 116 p.
2. Efimov O.Yu., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. *Formirovanie struktury, fazovogo sostava staley i spлавov v uprochnyayushchikh tehnologiyah obrabotki davleniem* (Formation of the structure, phase composition of steels and alloys in hardening technologies forming). Novokuznetsk: InterKuzbass, 2012. 345 p.
3. Matyuk V.F. *Nerazrushajushij kontrol' i diagnostika*. 2011. № 1. Pp. 3 – 31.
4. Sorokin V.G. *Marochnik staley i сплавov* (Grade list steels and alloys). Moscow: Mashinostroenie, 1989. 640 p.
5. Utevskiy L.M. *Difraktsionnaya elektronnaya mikroskopiya v metallovedenii* (Diffractive electron microscopy in physical metallurgy). Moscow: Metallurgiya, 1973. 584 p.
6. Hirsh P., Hovi A., Nikolson R. etc. *Elektronnaya mikroskopiya tonkih kristallov* (Electron microscopy of thin crystals). Moscow: Mir, 1968. 574 p.
7. Gromov V.E., Kozlov Ye.V., Bazaykin V.I. etc. *Fizika i mehanika volocheniya i ob'emnoy shtampovki* (Physics and mechanics of drawing and volume punching). Moscow: Nedra, 1997. 293 p.
8. Ivanov Yu.F., Kornet E.V., Kozlov Ye.V., Gromov V.E. *Zakalennaya konstruksionnaya stal': struktura i mekhanizmy uprochneniya* (Hardened steel for construction: the structure and mechanisms of hardening). Novokuzneck: izd. SibGIU, 2010. 174 p.
9. Tsepkin A.S., Rummyantsev M.I., Shubin I.G., Pitrinina M.A. *Byulleten' «Chernaya metallurgiya»*. 2008. № 5. Pp. 37 – 40.
10. Pikerin F.B. *Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka staley* (Physical metallurgy of steels and development). Moscow: Metallurgiya, 1982. 184 p.
11. Gorelik S.S. *Rekristallizatsiya metallov i сплавov* (Recrystallization of metals and alloys). Moscow: Metallurgiya, 1978. 568 p.
12. Frantsenyuk I.V., Zaharov A.E. *Uskorennoe ohlazhdenie lista* (Accelerated cooling the sheet). Moscow: Metallurgiya, 1992. 186 p.

Received April 23, 2013

УДК 621.793.184+539.216.2

## ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ КОМПОЗИТА TiN – TiNi, ПОЛУЧЕННОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ ОСАЖДЕНИЕМ

**В.В. Рубаник<sup>1,2</sup>**, д.т.н., профессор, директор

**В.В. Рубаник<sup>1,2</sup>** (мл.), к.ф.-м.н., вед. научн. сотрудник, заведующий кафедрой

**Д.А. Багрец<sup>1</sup>**, мл. научн. сотрудник

**В.П. Бобров<sup>1</sup>**, научный сотрудник

<sup>1</sup> Институт технической акустики НАН Беларуси (Витебск, Беларусь)

<sup>2</sup> Витебский государственный технологический университет (Витебск, Беларусь)

**Аннотация.** Исследовалась микротвердость композиции TiN – TiNi, полученной ионно-плазменным осаждением пленки нитрида титана на поверхность сплава TiNi. Показана возможность аналитически определять микротвердость тонких поверхностных слоев по методу восстановленного отпечатка. Предложенный режим осаждения защитного покрытия TiN на поверхность сплава TiNi позволил получить барьерный слой с твердостью, близкой к твердости основы, удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к изделиям на основе никелида титана для применения в медицине.

**Ключевые слова:** никелид титана, сверхупругость, эффект памяти формы, защитные покрытия, ионно-плазменное осаждение, микротвердость.

E-MAIL: ita@vitebsk.by

В настоящее время сплавы на основе никелида титана (TiNi) широко применяются в различных отраслях науки и техники благодаря уникальным эффектам памяти формы и сверхэластичности. Проблема практического применения этих сплавов в медицине связана с необходимостью снижения концентрации атомов никеля, оказывающих токсическое воздействие на организм, в поверхностных слоях изделий из никелида

титана и исключения их диффузии в биологическую среду [1 – 4]. Одним из способов повышения коррозионной стойкости и биосовместимости сплавов TiNi является создание на их поверхности барьерных слоев, в частности, методами ионно-плазменного осаждения покрытий на основе TiN [3, 5].

Известно, что покрытия TiN толщиной 5 – 10 мкм характеризуются высокими физико-механическими

свойствами (твердость  $H_u = 20 \div 25$  ГПа, модуль упругости  $E = 300 \div 320$  ГПа), сопротивлением износу и широко применяются для упрочнения режущего и лезвийного инструмента [6 – 9]. Однако такие покрытия, обладая высокой хрупкостью, не обеспечивают высокой прочности сцепления с подложкой при деформировании материала более 2 %, что может приводить к их разрушению и повреждению мягких тканей организма [10, 11]; в связи с этим накладываются жесткие ограничения к свойствам поверхности изделий из сплавов TiNi медицинского назначения [12]. Поэтому, наряду с коррозионной стойкостью, барьерный слой должен быть прочно сцеплен с основой при деформациях 6 – 8 %, характерных для никелида титана в сверхупругом состоянии, а также иметь твердость, близкую к твердости подложки.

Целью настоящей работы являлось получение композиции TiN – TiNi ионно-плазменным осаждением нитрида титана на поверхности сплава TiNi и исследование ее микротвердости.

Покрытия из нитрида титана TiN наносили методом вакуумно-дугового осаждения с помощью установки «Булат-6» на образцы в виде диска диам. 10 мм и высотой 2 мм из сплава TiNi примерно эквиатомного состава. Перед загрузкой в вакуумную камеру образцы механически полировали, затем подвергали очистке в ультразвуковой ванне в моющей среде. В камере установки образцы предварительно подвергали ионной очистке и нагреву поверхности ионами металлической плазмы титана при потенциале смещения 800 В, что обеспечивало нагрев подложки до температуры 400 °С. Затем потенциал уменьшали до 100 В и производили осаждение подслоя титана в течение 2 мин. Далее осуществляли напуск реакционного газа (азота) и осаждали покрытие нитрида титана TiN в течение 15 мин при токе дуги 90 А, давлении азота 0,3 Па. По окончании процесса образцы выдерживали в вакуумной камере для охлаждения до 100 – 120 °С.

Толщину пленки измеряли на поперечном шлифе образца с помощью сканирующего электронного микроскопа «Mira» фирмы Tescan (Чехия). Рентгеноструктурный анализ образцов с покрытиями TiN проводили, используя дифрактометр ДРОН-2 с помощью  $Fe-K_\alpha$  излучения. Микротвердость композиции покрытие – подложка определяли с помощью прибора ПМТ-3М с алмазной пирамидкой Виккерса при нагрузках на индентор 10, 20, 50, 100, 200 г. Для каждого значения нагрузки выполняли по три измерения. Глубину отпечатка определяли аналитически из соотношения  $h = 0,14d$ , где  $h$  – глубина индентирования;  $d$  – измеренная диагональ отпечатка.

На поперечном шлифе (рис. 1, а) видно, что осажденное покрытие толщиной 0,8 мкм является двухслойным (TiN – Ti) с четкой границей раздела между подслоями и подложкой, визуально наблюдается характерный для нитрида титана золотисто-желтый цвет. По

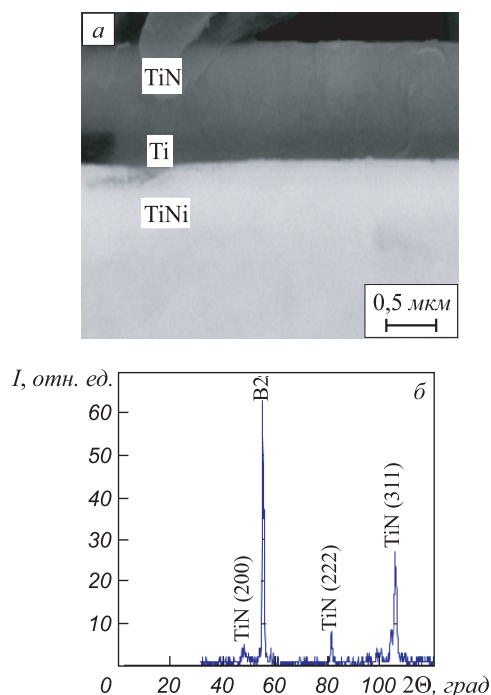


Рис. 1. Микрофотография поперечного шлифа (а) и фрагмент дифрактограммы (б) образца TiNi с покрытием TiN

результатам рентгеноструктурного анализа покрытие представляет собой кубическую фазу TiN с гранцентрированной решеткой типа Na – Cl (рис. 1, б).

Одним из основных способов оценки механических свойств покрытий является измерение микротвердости по восстановленному отпечатку, при котором измеряют диагональ отпечатка ( $d$ , мкм) после снятия нагрузки ( $P$ , Н) на индентор. Наибольшее распространение получил наконечник Виккерса в виде алмазной четырехгранной пирамидки с углом при вершине 136°; твердость рассчитывается по формуле.

$$HV = 0,189 \frac{P}{d^2} 10^6.$$

Недостатком указанного способа для случая тонких пленок является то, что существенное влияние на результат оказывает более мягкая подложка, что приводит к получению заниженных значений микротвердости пленки [13 – 15].

Сравнение зависимостей микротвердости от глубины внедрения индентора для подложки TiNi и композиции TiN – TiNi (рис. 2, а) показало, что осажденный слой нитрида титана незначительно влияет на микротвердость композита. Объясняется это тем, что глубина индентирования сопоставима (при нагрузке 10 и 20 г) либо значительно больше (при нагрузке 50, 100 и 200 г) толщины пленки; т.е. влияние более мягкой ( $H_0 = 2$  ГПа) подложки никелида титана явно выражено. Для исключения влияния мягкой подложки авторами работы [16] предложено использовать линейную экстраполяцию функции  $f(h) = \log(H_k - H_0)$  (где  $H_k$  и  $H_0$  – микротвер-

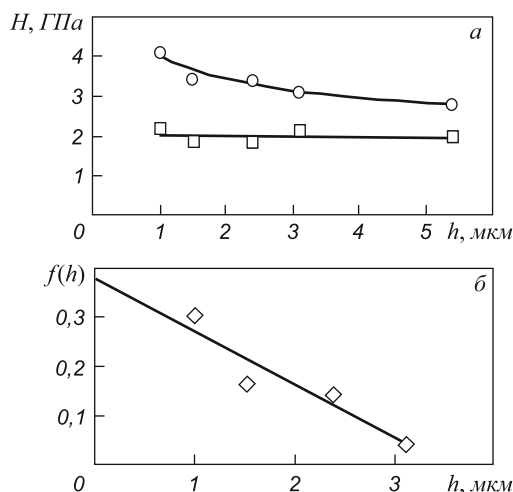


Рис. 2. Зависимости микротвердости подложки TiNi (□) и композиции TiN – TiNi (○) (а) и функции  $f(h)$  (б) от глубины внедрения индентора

дость композиции и подложки) на нулевую глубину индентирования, где твердость композиции будет равна твердости исследуемой пленки.

На рис. 2, б представлена линейная экстраполяция функции  $f(h)$  для измеренных значений микротвердости композиции TiN – TiNi. Микротвердость  $H_f$  покрытия TiN, определенная таким образом, составила 4,4 ГПа.

Существуют теоретические зависимости определения микротвердости тонких пленок, учитывающие влияние подложки на процесс измерения. Накопленный опыт в области исследования механических свойств нитридных покрытий на различных подложках позволил авторам работы [17] вывести соотношение для определения твердости системы покрытие – подложка при микроиндентировании

$$H_k = H_0 + \frac{H_f - H_0}{1 + \left(\frac{\beta}{\beta_0}\right)\chi},$$

где  $\beta$  – относительная глубина индентирования, определяемая отношением глубины отпечатка к толщине покрытия;  $\beta_0, \chi$  – безразмерные параметры.

Физический смысл параметра  $\beta_0$  заключается в том, что при этом значении относительной глубины индентирования на величину микротвердости композиции в равной степени влияют твердость покрытия и твердость подложки (рис. 3, а).

В работах [17, 18] исследовали пленки на основе TiN разной толщины, осажденные на различных подложках. Было установлено, что значение  $\beta_0$  находится в пределах 0,2 – 0,6. Применяв эти граничные значения для кривой микроиндентирования композиции TiN – TiNi, был определен интервал микротвердости пленки TiN, который составил 6,2 – 7,4 ГПа (рис. 3, б).

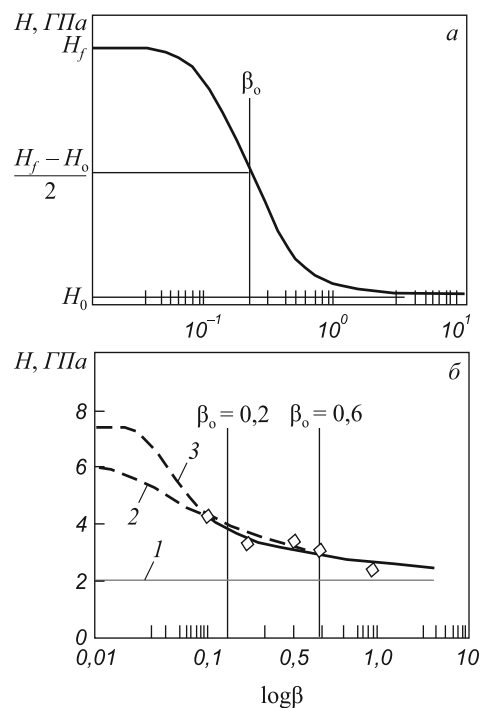


Рис. 3. Вид кривой индентирования системы твердая пленка – мягкая подложка (а) и ее интерпретация для случая пленки TiN на подложке из никелида титана (б): 1 – микротвердость подложки; 2 – 3 – микротвердость пленки при  $\beta_0 = 0,6$  и  $\beta_0 = 0,2$

В работе [19] предложено рассчитывать микротвердость покрытия по следующей зависимости:

$$H_f = H_k + \frac{H_k - H_0}{2 \frac{t}{h} + 3 \left(\frac{t}{h}\right)^2};$$

здесь  $t$  – толщина покрытия;  $h$  – глубина отпечатка.

Значения микротвердости композиции TiN – TiNi приведены ниже:

$P$ , г	$H_0$ , ГПа	$H_k$ , ГПа	$h$ , мкм	$t$ , мкм	$H_f^{[19]}$ , ГПа	$H_f^{[20]}$ , ГПа
10	2,0	4,06	1,0	0,8	4,6	4,2
20	2,0	3,45	1,5	0,8	4,2	3,9
50	2,0	3,42	2,4	0,8	4,8	4,5
100	2,0	3,1	3,1	0,8	4,6	4,4
200	2,0	2,66	5,4	0,8	4,4	4,4

Микротвердость покрытия TiN, рассчитанная по вышеприведенной зависимости, находится в пределах 4,2 – 4,8 ГПа.

Поскольку в исследуемых пленках глубина индентирования для всех нагрузок превышает толщину покрытия (т.е. имеет место «прокалывание» пленки), можно воспользоваться способом, предложенным в работе [20], в соответствии с которым твердость покрытия определяется по формуле

$$H_f = \frac{H_k - (1-n)H_o}{n},$$

где  $n = 1 - \frac{(h-t)^2}{h^2}$ .

Приведенные данные хорошо согласуются между собой, в особенности при больших ( $P \geq 100$  г) нагрузках, когда погрешность измерения диагонали отпечатка сводится к минимуму. Кроме того, эти результаты соответствуют полученному значению  $H_f$ . Истинная микротвердость пленки нитрида титана толщиной 0,8 мкм, осажденной на подложке из никелида титана, составляет около 4,4 ГПа.

**Выводы.** Микротвердость пленки TiN на подложке из никелида титана, определенная аналитически, оказалась сопоставима с твердостью подложки и существенно ниже твердости износостойких покрытий на основе TiN. Можно предположить, что это обусловлено малой толщиной пленки, большим содержанием в покрытии мягкой капельной фазы  $\alpha$ -Ti, характерной для вакуумно-дуговых технологий, наличием как поверхностных, так и объемных дефектов, а также режимом осаждения ( $P_{N_2} = 0,3$  Па). Предложенный режим нанесения защитной пленки TiN на поверхность сплава TiNi позволил получить поверхностный слой с невысокой твердостью, удовлетворяющей требованиям для изделий медицинского назначения на основе никелида титана.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Лотков А.И., Мейснер Л.Л., Гришков В.Н. // Физика металлов и металловедение. 2005. Т. 99. № 5. С. 66 – 78.
2. Ryhanen J. Biocompatibility of Nitinol // Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies. 2000. Vol. 9. P. 99 – 107.
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. P. 129 – 136.
4. Гюнтер В.Э., Миргазизов М.З. // Российский вестник дентальной имплантологии. 2004. № 1. С. 52 – 56.
5. Starosvetsky D. and Gotman I. Corrosion behavior of titanium nitride coated Ni – Ti shape memory surgical alloy // Biomaterials. 2001. Vol. 22. P. 1853 – 1859.

6. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.
7. Андреев А.А., Костюк Г.И., Минаев Н.А. – В кн.: сб. науч. тр. Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: 2011. – 340 с.
8. Табаков В.П., Чихранов А.В. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 4. С. 292 – 297.
9. Андреев А.А., Григорьев С.Н., Горбань В.Ф. и др. // Вестник МГТУ «Станкин». 2010. №3 (11). С. 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. P. 1640 – 1646.
11. Nash P., Iaganth C.S. The Ni – Zr System // Bull. Of Alloy Phase Diagrams. 1984. Vol. 5. № 2. P. 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. P. 393 – 413.
14. Быков Ю.А., Карпухин С.Д. // Справочник. Инженерный журнал. 2003. № 10. С. 26 – 28.
15. Методы определения твердости металлических материалов / А.Г. Колмаков, Ю.И. Головин, В.Ф. Терентьев, М.Б. Бакиров. – Воронеж: изд. Воронежского гос. ун-та, 2000. – 80 с.
16. Трахтенберг И.Ш., Владимиров А.Б., Югов В.А. и др. // Физика металлов и металловедение. 2005. Т. 99. № 6. С. 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. P. 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. P. 171.
19. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Романов И.Г. // Изв. Академии наук. Сер. физическая. 2002. Т. 66. № 8. С. 1223 – 1225.
20. Пат. 2222801. Способ определения твердости покрытия / Быков Ю.А., Карпухин С.Д., Бойченко М.К., Чепцов В.О. // Бюллетень изобретений. 2004. № 3. Заявл. 05.11.2002. Опубл. 27.01.2004.

© 2014 г. В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.),  
Д.А. Багрец, В.П. Бобров  
Поступила 20 мая 2013 г.

**MICROHARDNESS MEASUREMENT OF TiN – TiNi COMPOSITE OBTAINED BY ION-PLASMA DEPOSITION**

V.V. Rubanic<sup>1,2</sup>, Dr. Eng., Director, Professor  
V.V. Rubanic<sup>1,2</sup> (jr.), Cand. Eng., Senior Researcher, Head of the Chair  
D.A. Bagrets<sup>1</sup>, Junior Researcher  
V.P. Bobrov<sup>1</sup>, Researcher associate

<sup>1</sup> State scientific institution Institute of acoustic engineering of Belarus National Academy of Sciences (Vitebsk, Belarus)

<sup>2</sup> Vitebsk State Technological University (Vitebsk, Belarus)

E-MAIL: ita@vitebsk.by

**Abstract.** The paper deals with the microhardness of TiN – TiNi composite obtained by iron-plasma deposition of titanium nitride on the TiNi alloy

surface. The possibility to determine analytically the microhardness of thin surface layers according to the method of a restored print has been shown. The microhardness of the protective layer obtained by the proposed deposition regime is close to the base microhardness that meets the requirements for the TiNi-based items for medical applications.

**Keywords:** titanium nickelide, superelasticity, shape memory effect, protective coatings, ion-plasma deposition, microhardness.

**REFERENCES**

1. Lotkov A.I., Meysner L.L., Grishkov V.N. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2005. T. 99. № 5. Pp. 66 – 78.
2. Ryhanen J. Biocompatibility of Nitinol. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*. 2000. Vol. 9. Pp. 99 – 107.



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. Bely A.V., Karpenko G.D., Mishkin N.K. *Struktura i metody formirovaniya iznosostoykikh poverkhnostnykh sloev* (Structure and methods of forming wear-resistant layers poverkhnostnykh). Moscow: Mashinostroenie, 1991. 320 p.
7. Andreev A.A., Kostyuk G.I., Minaev N.A. – *V kn.: sb. nauch. tr. Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta «HPI»*. Har'kov: 2011. 340 p.
8. Tabakov V.P., Chihranov A.V. *Izvestia Samarского 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 opredeleniya tverdsti 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 tverdsti 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<sup>1</sup>, аспирант, ст. преподаватель

Л.И. Квеглис<sup>2</sup>, д.ф.-м.н., профессор

Ф.М. Носков<sup>2</sup>, к.т.н., доцент

Я.В. Отнюков<sup>2</sup>, аспирант

А.А. Калитова<sup>1</sup>, аспирант

<sup>1</sup> Восточно-Казахстанский государственный университет (Усть-Каменогорск, Казахстан)

<sup>2</sup> 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 существ-

венный 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.