

Литература.

1. М.А. Белоцерковский Триботехнические характеристики газопламенных покрытий Трение и износ Т. 21, № 5, С.534-539.
2. Витязь П.А., Ивашко В.С., Ильюшенко А.Ф., Шевцов А.И. Теория и практика нанесения защитных покрытий // Мн., 1998.
3. Белый А.В., Кукареко В.А., Патеюк А. Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота // Минск: Белорусская наука, 2007. 244 с.
4. Григорчик А.Н., Кукареко В.А., Белоцерковский М.А., Белый А.В. Структура и триботехнические характеристики газотермического покрытия из проволоочной стали 06Х19Н9Т обработанного ионами азота // Известия вузов. Черная металлургия. №2. – 2014. – Новокузнецк (принята к печати).
5. Ляхович Л.С. Специальные стали. Минск: Высшая школа, 1985. 208 с.
6. Kukareko V. A., Belyi A.V., Belotserkovskii M.A., and Grigorichik A.N. Effect of Ion Beam Nitriding on Structure, Phase State, and Tribological Behavior of Efficient Thermal Spray Coatings Deposited from Various Classes of Rod Steels // Journal of Friction and Wear, 2013, Vol. 34, No. 6, pp. 475–480.
7. Григорчик А.Н., Кукареко В.А., Белый А.В., Белоцерковский М.А. Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки.- Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2013, 148-157.

**ОБЪЕМНОЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ФИЗИЧЕСКИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ  $Ni_3Al$  И СПЛАВА НА ЕГО ОСНОВЕ**

*В.Е. Овчаренко* \*\*\*, *д.т.н., профессор, Е.Н. Боянгин* \*, *к.т.н.*

*\*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4, тел.(3822)492771*

*\*\*Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета  
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26  
E-mail: ove45@mail.ru*

**1. Введение**

Алюминиды никеля и, прежде всего интерметаллическое соединение  $Ni_3Al$ , являются основой современных и перспективных жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях тепловых и силовых нагрузок [1,2]. Применение интерметаллида  $Ni_3Al$  в качестве основы указанных сплавов ограничено низкими значениями его пластичности и прочности – поликристаллический  $Ni_3Al$  как при низких, так и при повышенных температурах разрушается хрупко по границам зерен [3-6]. Классическим подходом к решению задачи повышения пластичности и прочности интерметаллического соединения  $Ni_3Al$  является легирование интерметаллида более тугоплавкими по сравнению с никелем элементами [7-12]. Развитием методов комплексного легирования при решении проблемы повышения прочностных свойств интерметаллического соединения  $Ni_3Al$  и сплавов на его основе является разработка методов создания в интерметаллическом соединении субмикро- и наноструктурной составляющей, формирование которой в материалах с высоким уровнем энергии межатомных связей определяет неизбежность вовлечения в процесс деформации максимально возможного числа структурных уровней в материале, приводя к локализации актов пластической деформации в широком диапазоне размерностей структурных составляющих материала, к снижению величины концентрационных пиков упругих напряжений в объеме материала и, в конечном счете, к смене доминирующего механизма зарождения и роста магистральной трещины: от зарождения и последовательного продвижения вершины трещины в микроскопически неповрежденном материале к образованию в окрестности вершины системы микроскопических повреждений с последующим их объединением и присоединением к вершине [13]. Смена механизма развития трещин обеспечивает существенное увеличение времени и работы разрушения материала.

Формирование структур, содержащих наноразмерную составляющую, достигается методами интенсивной пластической деформации материалов [14]. Поскольку прочность и пластичность поликристаллического интерметаллида  $Ni_3Al$  практически полностью ограничены хрупким межкристаллитным разрушением, измельчение зеренной структуры интерметаллида известными методами интенсивной пластической деформации удается только на микрообразцах и только на наковальнях

Бриджмена [15]. Однако, как свидетельствуют результаты предварительных исследований, реализовать интенсивную пластическую деформацию интерметаллического соединения  $Ni_3Al$  на достаточно масштабных по размеру образцах оказалось возможным в узком температурно-временном интервале его кристаллизации и охлаждения в волне теплового взрыва порошковой смеси никеля с алюминием [16-18].

Целью настоящей работы является исследование влияния пластической деформации продукта высокотемпературного синтеза в условиях теплового взрыва порошковой смеси исходных компонентов на микроструктуру, и температурные зависимости прочности и пластичности интерметаллического соединения  $Ni_3Al$  и сплава на его основе.

## 2. Материал и методы исследования

Интерметаллическое соединение  $Ni_3Al$  синтезировали в порошковых смесях никеля с алюминием (размер частиц 0,98-1,2 мкм и 1,0 мкм, соответственно) стехиометрического состава, сплав на основе интерметаллида синтезировали в порошковых смесях никеля и алюминия с добавлением 15,0 об.% порошка никельхромового сплава (размер частиц 40,0 мкм). Тепловой взрыв прессовки пористостью 30% инициировали ее нагревом до самовоспламенения с последующим компактированием продукта высокотемпературного синтеза с его частичной экструзией через отверстие в нижней части пресс-формы. Образцы для исследований получали резкой полученных в пресс-форме слитков интерметаллического соединения  $Ni_3Al$  и сплава на его основе.

Микроструктуру синтезированного интерметаллида и его сплава исследовали методами оптической металлографии (Neophot 32), сканирующей электронной микроскопии с микрорентгеноспектральным анализом элементного состава (Quanta 200 3D), рентгеновской дифрактометрии (ДРОН-3), просвечивающей дифракционной электронной микроскопии (Philips CM 30). Испытания на растяжение образцов были проведены на машине «INSTRON 3369» со скоростью деформирования 0,2 мм/мин.

## 3. Результаты и их обсуждение

Как показано нами ранее, пластическая деформация продукта высокотемпературного синтеза формирует в интерметаллическом соединении мультимодальную зеренную структуру, содержащую мультизерна, состоящие из микрозерен субмикронной размерности с нанокристаллической структурой в стыках и на границах зерен  $\gamma'$ -фазы (рис.1) [17,18].

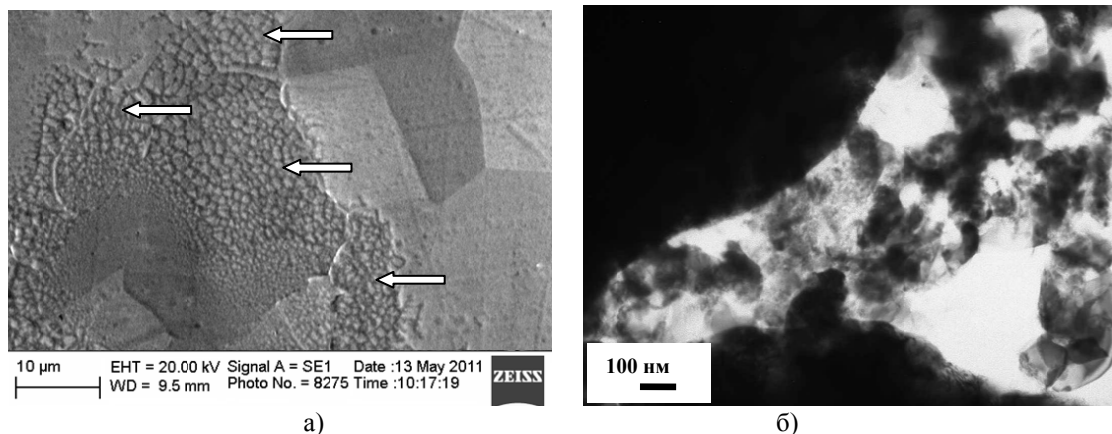


Рис. 1. Морфология мультизерен (указаны стрелками) интерметаллического соединения  $Ni_3Al$ , синтезированного с пластической деформацией продукта синтеза (а), и тонкая структура межчастичных прослоек в мультизернах (электронная микроскопия на просвет) (б)

Формирование в интерметаллическом соединении  $Ni_3Al$  мультимодальной зеренной структуры, содержащей наноструктурную составляющую, оказывает прямое влияние на физические и прочностные характеристики интерметаллического соединения – происходит значительное повышение его микротвердости, предела прочности и величины деформации до разрушения при растяжении (рис.2). Указанное повышение прочностных характеристик интерметаллического соединения находится в непосредственной зависимости от степени пластической деформации продукта высокотемпературного синтеза (величины содержания мультизерен в зеренной структуре интерметаллида) – с увеличением содержания мультизерен в структуре интерметаллида повышаются его микротвердость, предел прочности и величина деформации до разрушения.

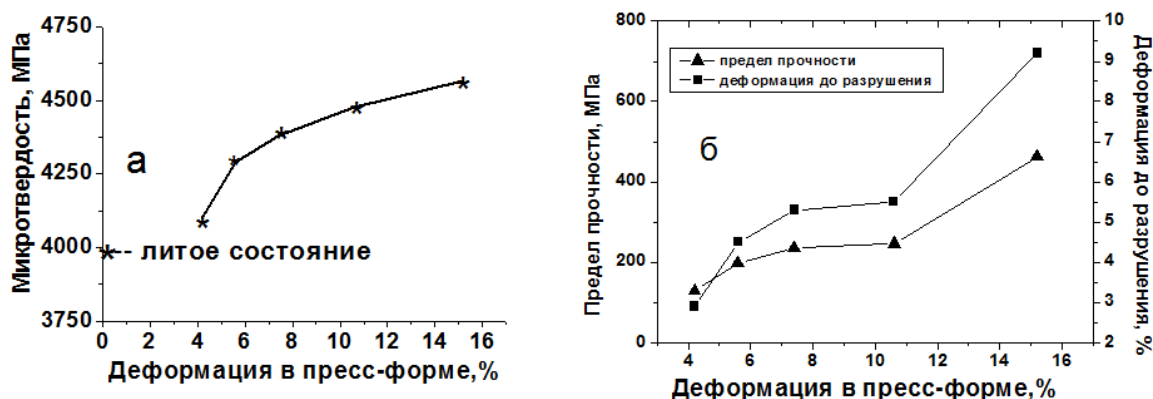


Рис. 2. Зависимости величины микротвердости (а), предела прочности и деформации до разрушения при растяжении (б) интерметаллического соединения от степени пластической деформации продукта высокотемпературного синтеза в пресс-форме

Поскольку интерметаллическое соединение  $Ni_3Al$  является основой современных жаропрочных сплавов, то в контексте сказанного выше представляет значительный интерес исследование влияния пластической деформации продукта синтеза при высокотемпературном синтезе сплава на основе интерметаллида  $Ni_3Al$  в порошковой смеси никеля с алюминием и металлическим связующим. Исследование было проведено на порошковой смеси следующего состава:  $(3Ni+Al)+15,0$  об.%  $(Ni-Cr)$ -сплава. Высокотемпературный синтез интерметаллического сплава указанного состава с пластической деформацией продукта синтеза был проведен в цилиндрической пресс-форме при степени деформации продукта синтеза 20%.

Установлено, что продукт высокотемпературного синтеза в порошковой смеси  $(3Ni+Al)+15,0$  об.%  $(Ni-Cr)$ -сплава состоит из интерметаллида  $Ni_3Al$  и  $(Ni-Cr)$ -сплава (рис. 4).

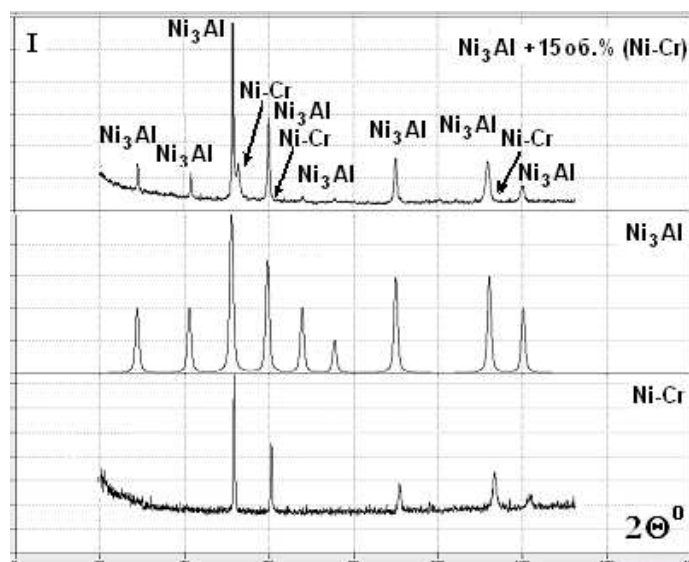


Рис. 4. Рентгенограммы синтезированного с пластической деформацией продукта синтеза сплава  $Ni_3Al+15,0$  об.%  $(Ni-Cr)$ ,  $(Ni-Cr)$ -сплава, интерметаллида  $Ni_3Al$

Зеренная структура синтезированного интерметаллического сплава представлена зернами интерметаллида  $Ni_3Al$  и мультимерами, состоящими из микрочастиц интерметаллида  $Ni_3Al$  (300-600 нм) с прослойками (20-70 нм) никельхромового сплава (рис. 5).

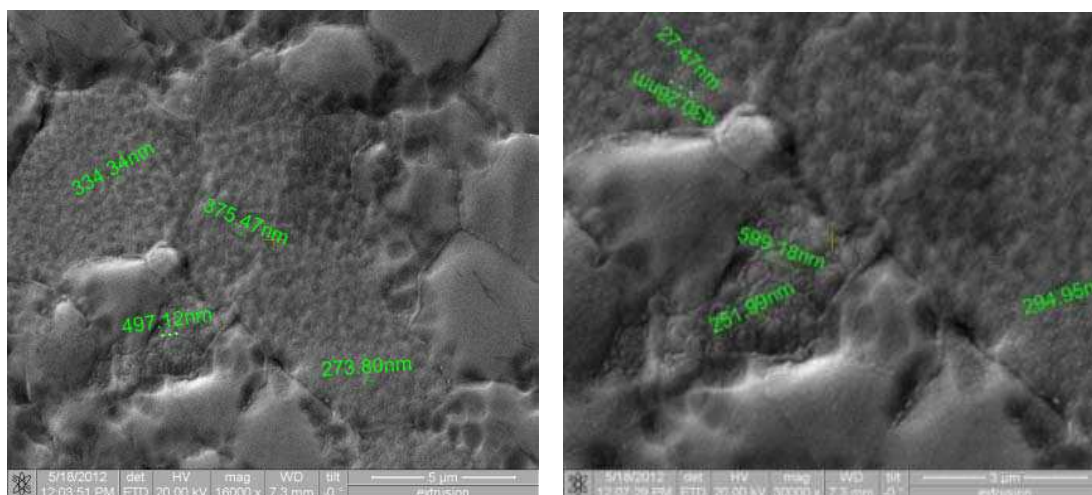


Рис. 5. Мультизерна в зеренной структуре синтезированного с пластической деформацией продукта синтеза интерметаллического сплава  $Ni_3Al+15,0$  об.% (Ni-Cr) с указанием размерности микрочерен и прослоек между ними

Характерно, что в зависимости от состояния интерметаллического продукта (литой интерметаллид, синтезированный под давлением интерметаллид, синтезированный под давлением с пластической деформацией продукта высокотемпературного синтеза, синтезированный под давлением интерметаллический сплав, синтезированный под давлением с пластической деформацией продукта высокотемпературного синтеза интерметаллический сплав) изменяется микротвердость конечного продукта – его микротвердость постепенно увеличивается при переходе от литого интерметаллида к синтезированному под давлению и далее к синтезированному под давлением с пластической деформацией продукта высокотемпературного синтеза и затем к синтезированному под давлением интерметаллическому сплаву и к синтезированному под давлением с пластической деформацией продукта высокотемпературного синтеза интерметаллическому сплаву (рис. 6).

На рис. 7 представлены температурные зависимости

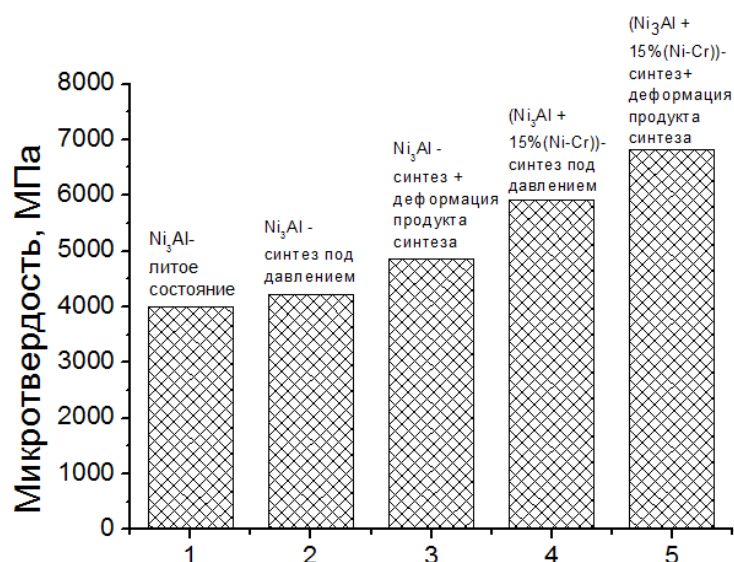


Рис. 6. Зависимость величины микротвердости от состояния интерметаллического продукта

На рис. 7,а представлены температурные зависимости предела прочности синтезированного под давлением интерметаллического соединения  $Ni_3Al$  в литом состоянии, синтезированном под давлением и синтезированном под давлением с пластической деформацией продукта высокотемпера-

турного синтеза. Все три зависимости имеют одинаковый характер, отражающий аномальный характер температурной зависимости прочности интерметаллического соединения  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . При этом можно констатировать, что формирование в интерметаллическом соединении мультимодальной зеренной структуры, содержащей наноструктурную составляющую, повышает величину предела прочности интерметаллида во всем исследованном температурном интервале.

Аналогичный характер температурной зависимости предела прочности получен и для интерметаллического сплава  $\text{Ni}_3\text{Al}+15,0$  об.% (Ni-Cr) (рис.7,б). При этом предел прочности интерметаллического сплава превышает по величине предел прочности интерметаллического соединения практически во все исследованном температурном интервале.

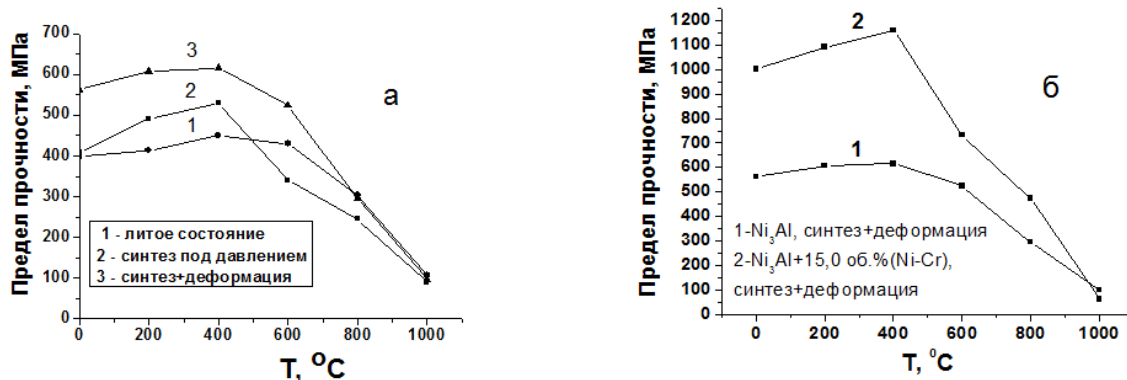


Рис. 7. Температурные зависимости предела прочности интерметаллического соединения  $\text{Ni}_3\text{Al}$  в литом состоянии, синтезированном под давлением и синтезированном под давлением с пластической деформацией продукта высокотемпературного синтеза (а) и температурные зависимости предела прочности интерметаллида и интерметаллического сплава, синтезированных с пластической деформацией продукта синтеза (б)

При температуре 1000 °С наблюдается полное сближение значений предела прочности как для всех состояний интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , так и для интерметаллида и интерметаллического сплава с мультимодальной зеренной структурой.

#### 4. Заключение

1. Объемное наноструктурирование интерметаллического соединения  $\text{Ni}_3\text{Al}$  и сплава на его основе в виде формирования мультимодальной зеренной структуры с наноструктурной составляющей при пластической деформации продукта синтеза в процессе высокотемпературного синтеза интерметаллического соединения  $\text{Ni}_3\text{Al}$  под давлением оказывает прямое (положительное) влияние на температурные зависимости прочностных характеристик интерметаллического соединения – происходит значительное повышение предела прочности при растяжении при температурах до 1000 °С.

2. Единообразный характер температурных зависимостей предела прочности интерметаллического соединения  $\text{Ni}_3\text{Al}$  в литом и синтезированном состояниях и интерметаллического сплава на его основе с мультимодальной зеренной структурой означает, что определяющий вклад в формировании прочностных свойств интерметаллического сплава определяет структурное состояние интерметаллической  $\gamma'$ -фазы – объемное наноструктурирование в виде формирования мультимодальной зеренной структуры с наноструктурной составляющей повышает прочностные свойства интерметаллического сплава.

3. Сближение значений предела прочности для синтезированного под давлением, синтезированного под давлением с пластической деформацией продукта синтеза и для интерметаллида в литом состоянии при температуре испытаний 1000 °С означает необходимость температурной стабилизации формирующейся в процессе пластической деформации продукта высокотемпературного синтеза мультимодальной зеренной структуры с наноструктурной составляющей интерметаллического соединения.

Литература.

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М.: «МИСИС», 2001.-632 с.
2. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением/ Колл. авторов, под научной редакцией Е.Н. Каблова. - М.: Изд. Дом МИСИС.- 2008.-328 с.

3. Stoloff N.S., Liu C.T., Deevi S.C. Emerging application of intermetallics// Intermetallics.-2008.-8.-P.1313-1320.
4. Sikka V.K., Deevi S.C., Viswanathan S., Swindeman R.W., Santella M.L. Advances in processing of Ni<sub>3</sub>Al –based intermetallics and applications//Intermetallics.-2000.-8.-P.1329-1337.
5. Pope D.P., Ezz S.S. Mechanical properties of Ni<sub>3</sub>Al and nickel-base alloys with high volume fraction of  $\gamma'$ // Int. Met. Rev.- 1984.- V.29, №3.- P.136-167.
6. Deevi S.C., Sikka V.K., Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing and applications//Intermetallics.-1996.-4.-P.357-375.
7. Shulson E.M., Weihs T.P., Viens D.V., Baker I. The effect of grain size on the yield strength of Ni<sub>3</sub>Al//Acta Met. -1985.-V.33.-№ 9.-P. 1587-1591.
8. Shulson E.M. Properties and potential applications of intermetallic compounds produced from powders//Int. Journal Powder Met.-1987.-V. 23.- № 1.- P. 25-32.
9. Kim M.S., Hanada S., Watanabe S., Izumi O. Effekt of grain size on strength, ductility and fracture in recrystallized Ni<sub>3</sub>Al doped with boron//Trans. Jap. Inst. Metals.-1988.-V. 29. -№ 4.-P. 274-283.
10. Nishimura C., Liu C.T. Reaction sintering of Ni<sub>3</sub>Al to near full density//Scr. Metall. Mater.-1992.-№ 26.- P. 381-385.
11. Бакач Г.П., Чубенко Т.Ю., Овчаренко В.Е., Любимой В.П., Дударев Е.Ф., Каминский К.В. Влияние хрома на структуру, прочность и пластичность СВС интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al//Известия ВУЗов. Физика.- 1993.- Т. 36.- № 6.- С. 30-36.
12. Mishima J., Miura S., Suzuki T. High temperature strength of Ni<sub>3</sub>(Al,x) single crystals//J. Jap. Soc. Heat Treatment.-1989.-V.29, №1.-P. 19-24.
13. Псахье С.Г., Овчаренко В.Е., Князева А.Г., Шилько Е.В. Формирование многомасштабной структуры в поверхностных слоях и стойкость металлокерамического сплава в условиях механических воздействий //Физическая мезомеханика.-2011.-Т.14, №6.-С.23-34.
14. Valiev R.Z., Estrin Y., Horita Z., et. al. Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation.-2006.-April.-JOM.-P. 33-39.
15. Корзников А.В., Идрисова С.Р., Димитров О.К., Пышминцев И.Ю., Сиренко А.А., Корзникова Г.Ф. Структура и механические свойства нанокристаллического интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al//Физика металлов и металловедение.- 1998.- Т.85, вып.85.- С.91-96.
16. Ovcharenko V.E. Effect of plastic deformation on microstructure and phase composition of Ni<sub>3</sub>Al intermetallic synthesized under pressure//Rare Metals.- 2009.-Vol. 28, Spec. Issue.- P.250-253.
17. Овчаренко В.Е., Чуудинов В.А., Сазанов Ю.А., Боянгин Е.Н., Лю Гуансюнь. Формирование «бимодальной» зеренной структуры и ее влияние на прочность и пластичность интерметаллического соединения Ni<sub>3</sub>Al//Перспективные материалы.-2011.-Спецвыпуск, №13.-С. 242-251.
18. Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Боянгин Е.Н. Формирование мультимодальной зеренной структуры и ее влияние на прочность и пластичность интерметаллического соединения Ni<sub>3</sub>Al//Деформация и разрушение материалов.-2012.-№10.-С.12-15.

**ВЛИЯНИЕ МАСШТАБНОСТИ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ  
НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И СТОЙКОСТЬ  
МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО СПЛАВА ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛА**

*В.Е. Овчаренко \*\*, д.т.н., профессор, А.А.Моховиков\*\*, к.т.н., доцент,  
Baohai YU\*\*\*, Dr. Eng., Yanhui ZHAO\*\*\*, Dr. Eng.*

*\*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
пр. Академический, 2/4, г.Томск, 634021, Россия*

*\*\*Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета  
652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26*

*\*\*\*Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 72 Wenhua Road, 110016, China  
E-mail: ove45@mail.ru*

**Введение**

Результаты количественных расчетов влияния разномасштабных структурных уровней и их сочетаний на закономерности деформирования и разрушения металлокерамического сплава в условиях высоких динамических нагрузок отражают принципиально новые возможности повышения фи-