

УДК 621.793; 669.8; 621.762; 669.018.45; 532.696.1

А.П. УМАНСКИЙ¹, Е.Н. ПОЛЯРУС¹, М.С. УКРАИНЕЦ¹, А.Г. ДОВГАЛЬ¹,
Л.М. КАПИТАНЧУК², В.И. СУББОТИН¹

¹ *Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев*

² *Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ИЗ НИХ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ NiAl-TiB₂

В статье представлены результаты исследований структуры и свойств композиционных материалов системы NiAl-TiB₂ и покрытий из них, предназначенных для защиты деталей ГТД, работающих в условиях высоких температур и нагрузок. Композиты и покрытия получены из равномерно размешанной смеси порошков TiB₂ и NiAl, изучена их микроструктура и химический состав. Триботехнические свойства разработанных покрытий исследовались при T=20 и 500°C. Показано, что, образующиеся на поверхности трения, оксиды выполняют роль твердой смазки. Установлено, что на характер и интенсивность износа существенно влияет температура трибоиспытаний, а также наличие армирующей боридной фазы.

Ключевые слова: композиционные материалы, дисперсное армирование, покрытия, интерметаллид NiAl, диборид титана, трибоиспытания.

Введение

Детали узлов ГТД, в частности – лопатки турбин, подвергаются сильному усталостному (из-за больших температурных перепадов и нагрузок, возникающих в процессе работы) и абразивному (работа в агрессивной абразивной среде) износу. Поэтому, разработка защитных покрытий, способных успешно противостоять такому комплексному износу является приоритетной на данный момент [1, 2].

В аэрокосмической промышленности успешно используется интерметаллид NiAl. Данный материал имеет низкую плотность, высокую коррозионную стойкость и относительно высокую теплопроводность [3-5]. В то же время, он имеет низкий предел текучести при высоких температурах, что приводит к разрушению оксидных пленок на его поверхности в процессе высокотемпературного трения [6]. Поэтому, чтобы использовать данный материал для защиты деталей узлов ГТД, его либо армируют дисперсными износостойкими частицами (бориды, оксиды), либо легируют [7, 8]. Для предотвращения абразивного изнашивания более предпочтительным является первый способ, так как в этом случае можно получить антифрикционное коррозионностойкое покрытие.

В данной работе исследованы свойства композиционного материала системы NiAl-TiB₂ и плазменных покрытий на его основе. Выбор диборида титана в качестве армирующего компонента объяс-

няется его высокими твердостью, высокой жаро- и износостойкостью, теплопроводностью.

1. Экспериментальная часть

В качестве исходных компонентов для получения композиционного материала и покрытий на его основе использовались серийные порошки TiB₂ и NiAl. Доля TiB₂ в композиционном материале составляла 15% (тут и далее масс.%).

Композит был получен путем спекания шихты из смеси исходных порошков при температуре 1855 °С в печи (ВДТА-8М) в среде гелия. Порошки для нанесения покрытий получены путем конгломерирования исходных компонентов на органическом связующем с последующим отсевом до фракции 70-100 мкм. Плазменные покрытия напылялись на воздухе с помощью установки УПУ-3Д. В качестве плазмообразующего газа использовалась смесь аргона с водородом, транспортирующего газа – аргон. Толщина покрытий составила ~ 500 мкм.

Покрытия для трибоиспытаний наносились на торцы цилиндрических образцов (h = 10 мм, Ø = 10 мм). Трибоиспытания проводились на машине трения, оснащенной высокотемпературным модулем (T = 500 °С) по схеме «стержень-диск». В качестве контртела использовали сталь P18. Параметры испытаний: нагрузка P = 8 МПа, скорость вращения V = 14 м/с. До и после трибоиспытаний фиксировался вес (с точностью до 0,0001 г) каждого из образцов.

Микроструктуру и химический состав композиционных материалов и полученных покрытий, а также поверхностей трения испытанных покрытий, исследовали на микроанализаторе JEOL JAMP – 9500F.

2. Результаты и обсуждение

Для установления совместимости компонентов композиционного материала изучена смачиваемость в системе NiAl-TiB₂, определены контактные углы. Результаты исследований показали, что в данной системе отсутствует интенсивное химическое взаимодействие между компонентами, а контактные углы составляют $\Theta = 15 - 20^\circ$. Из этого следует, что TiB₂ является перспективной добавкой в качестве армирующего компонента для композиционного материала на основе NiAl.

Компактный композиционный материал изготовлен путем спекания шихты NiAl-15%TiB₂ в атмосфере гелия. Одновременно со спеканием производился высокотемпературный дифференциально-термический анализ с регистрацией кривых нагрева и охлаждения. Результаты ВДТА изображены на рис. 1.

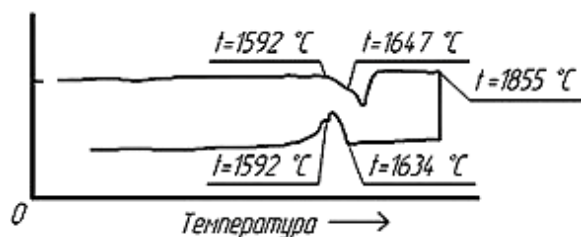


Рис. 1. Кривая дифференциально-термического анализа порошковой смеси NiAl-15%TiB₂

Как видно из рис.1, во время нагрева шихты в данной системе фиксируется два пика: первый (при $T \sim 1592^\circ\text{C}$) соответствует переходу NiAl из твердого в жидкое состояние (T плавления NiAl – 1640°C), а второй – при $T \sim 1634^\circ\text{C}$ – кристаллизации интерметаллидной матрицы. Отсутствие других пиков на термокривой еще раз подтверждает тот факт, что в исследуемой системе нет активного химического взаимодействия между компонентами композита.

Микроструктура полученного в результате спекания компактного материала показана на рис. 2. Композит представляет собой механическую смесь, состоящую из NiAl-матрицы (2), в которой равномерно распределены армирующие частицы TiB₂ (1).

Наличие единичных микротрещин в структуре композита обусловлено высокой скоростью охлаждения материала при ВДТА.

На рис. 3 представлена микроструктура композиционного покрытия NiAl-15%TiB₂. Структура

покрытия ламелеобразная и состоит из фазы на основе интерметаллида, с равномерно распределенными в ней включениями диборида.

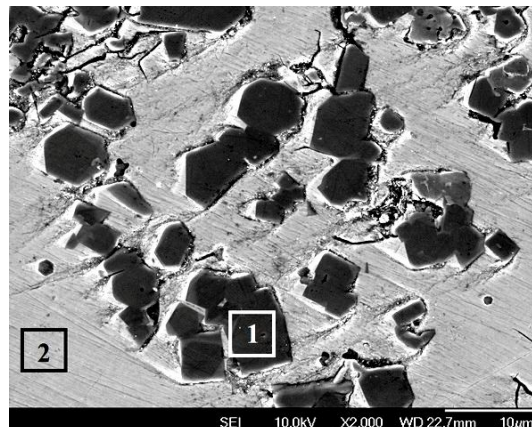


Рис. 2. Микроструктура композиционного материала NiAl-15%TiB₂

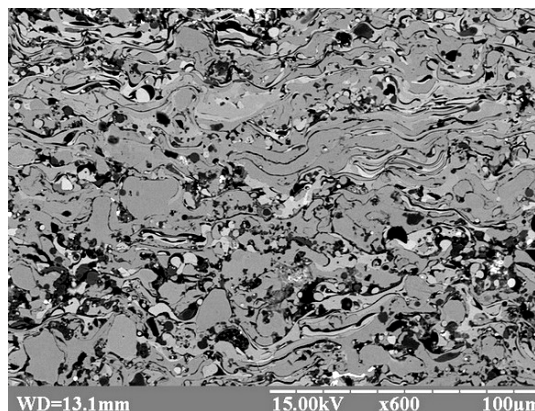


Рис. 3. Микроструктура плазменного покрытия NiAl-15%TiB₂

Так как данные материалы предназначены для применения в узлах ГТД в качестве защитных покрытий, работающих при повышенных температурах, были проведены их трибоиспытания при $T = 500^\circ\text{C}$.

Чтобы установить влияние температуры на механизмы износа также были проведены испытания при комнатной температуре.

Потери веса в процессе трибоиспытаний исследуемых образцов с покрытиями пересчитывались в линейный износ и представлены на рис. 4.

Результаты испытаний показали, что дисперсное армирование NiAl частицами TiB₂ в обоих случаях уменьшает интенсивность изнашивания покрытий по сравнению с исходным интерметаллидным покрытием.

Причиной повышения износостойкости армированного покрытия при $T = 20^\circ\text{C}$, является то, что в процессе трения в первую очередь работают боридные частицы, которые благодаря высокой твердости менее интенсивно изнашиваются.

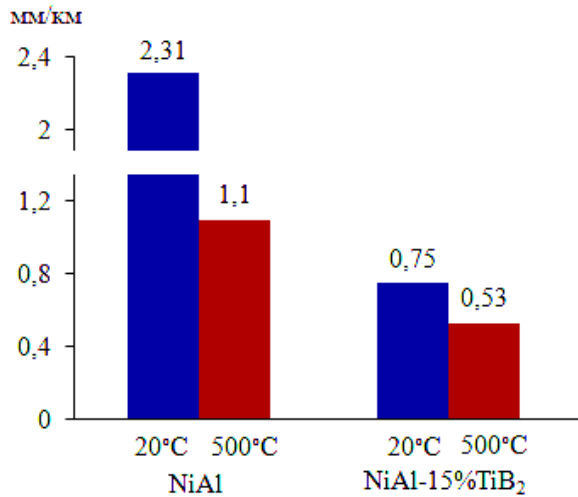


Рис. 4. Интенсивность изнашивания покрытий

Повышение износостойкости покрытий при высокотемпературных трибоиспытаниях можно объяснить тем, что при более высокой температуре в зоне трения начинают активно образовываться оксидные пленки, которые предотвращают схватывание между поверхностями образца и контртела.

Для подтверждения этого проведен микроанализ поверхностей трения.

На рис. 5 приведена микроструктура поверхностей трения покрытий, испытанных при комнатной температуре. Фазы 1 и 2 (рис. 5, а) в основном соответствуют оксиду железа. Разница в цвете фаз объясняется тем, что в фазе 2 толщина оксида железа меньше, поэтому микроанализатор регистрирует элементы интерметаллида.

Для покрытия NiAl-15%TiB₂ фазы 1 и 2 (рис. 5, б) также соответствуют оксидам железа,

только процент Fe во второй фазе гораздо больше, чем в первой. Третья фаза – это фаза на основе интерметаллида NiAl с дисперсными включениями диборида титана.

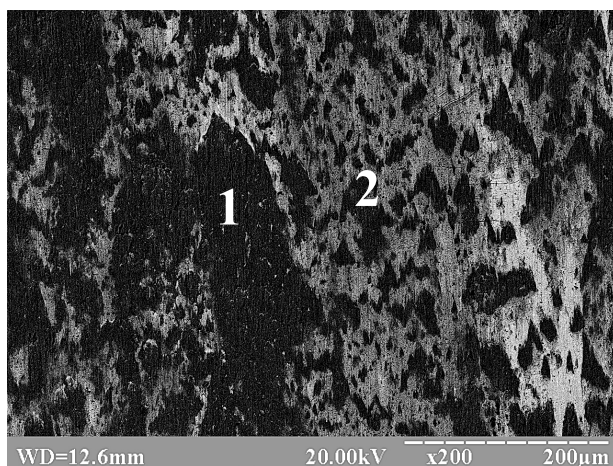
Микроструктура дорожек трения, полученных в результате высокотемпературных трибоиспытаний, приведена на рис. 6. На поверхности покрытия NiAl образуются две характерные фазы (рис. 6, а), которые соответствуют оксидам Ni, Al и Fe в разных соотношениях. Очевидно, что в результате высокотемпературных трибоиспытаний имеет место интенсивное окисление как поверхности покрытия, так и поверхности стального контртела с последующим переносом его оксидов на поверхность трения покрытия.

На поверхности трения покрытия NiAl-15%TiB₂ также фиксируются две характерные фазы (рис. 6, б). Фаза 1 – это преимущественно оксиды Ni, Al и Ti. Фаза 2 соответствует по составу композиционному покрытию NiAl-TiB₂.

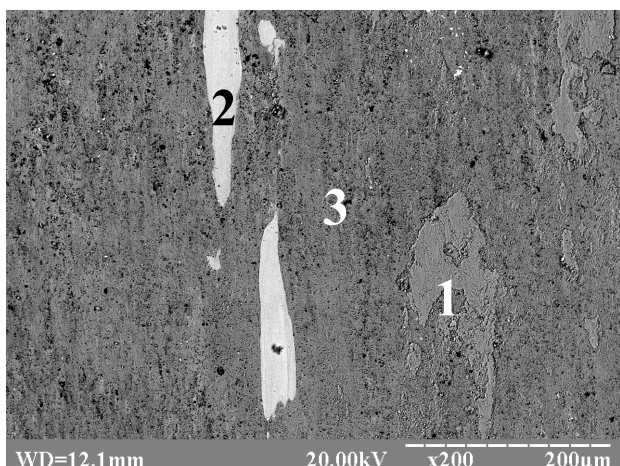
Таким образом, в процессе трения композиционного покрытия отсутствует его взаимодействие с материалом контртела, тем самым не происходит переноса продуктов трения на поверхность покрытия, что в результате способствует снижению износа покрытий. Для установления роли влияния оксидов, которые образуются на поверхностях трения разработанных материалов, было проведено изотермическое окисление компактного материала NiAl-15%TiB₂ на воздухе в течении 90 мин при температуре 1000 °С.

На рис. 7 изображено поперечное сечение компактного материала NiAl-15%TiB₂ после окисления, приведен состав оксидных фаз.

Установлено, что композиционный материал NiAl-15%TiB₂ окисляется селективно.



а



б

Рис. 5. Поверхности трения покрытий после трибоиспытаний при T=20 °С:

а – NiAl; б - NiAl-15%TiB₂

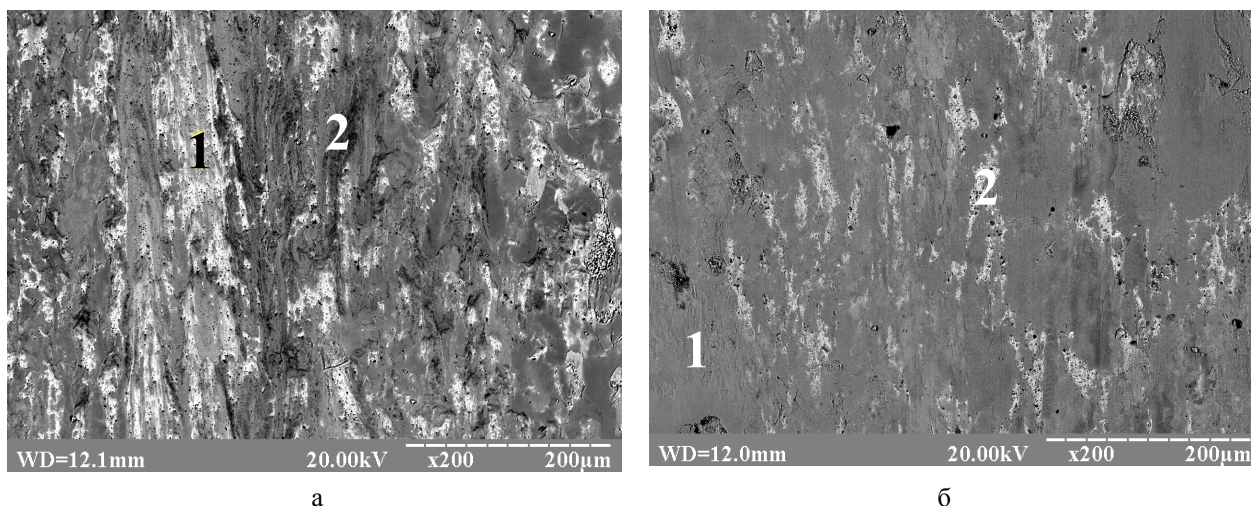


Рис. 6. Поверхности трения покрытий после трибоиспытаний при $T=500\text{ }^{\circ}\text{C}$:
а – NiAl; б - NiAl-15%TiB₂

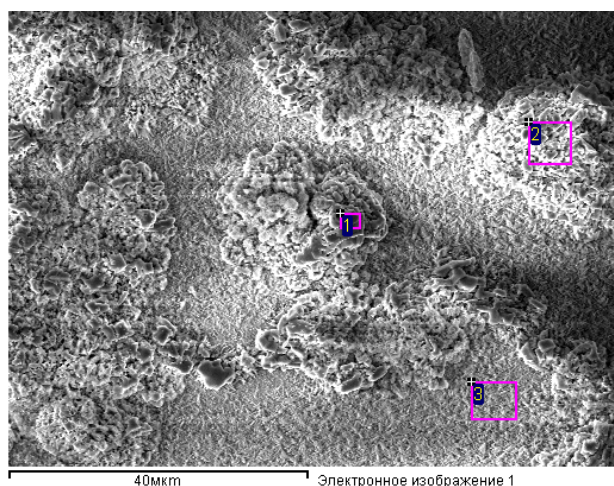


Рис. 7. Микроструктура композита NiAl-15%TiB₂ после окисления 90 мин

Таблица 1

Химический состав композита NiAl-15%TiB₂ после окисления 90 мин

Спектр	B	O	Al	Ti	Ni
1	1,03	74,44	2,13	21,29	0,23
2	0,58	68,67	15,20	11,55	2,98
3	9,05	63,63	24,81	1,09	0,30

При этом на матрице NiAl образуется оксид, который соответствует Al₂O₃ (спектр 3), а на зернах диборида титана образуются оксиды на основе Ti и Al (спектр 1, 2). Кроме того, толщина образовавшихся оксидов на зернах TiB₂ в 5-6 раз больше, чем Al₂O₃. Следовательно, образование оксидов на тугоплавких включениях происходит более интенсивно по сравнению с интерметаллидной матрицей. По-видимому, в процессе высокотемпературных трибоиспытаний эти оксиды выполняют роль твердой смазки, тем самым предотвращая интенсивное схватывание материала покрытия с контртелом, что

приводит в конечном результате к повышению износостойкости покрытий.

Выводы

Исследована структура и свойства композиционных материалов и покрытий из них на основе системы NiAl-15%TiB₂.

В результате трибоиспытаний разработанных композиционных покрытий при $T=20$ и $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ установлено, что на характер и интенсивность износа существенно влияет температура трибоиспытаний, а также наличие армирующей боридной фазы.

В результате высокотемпературных исследований установлено, что образование оксидов на включениях диборида титана происходит более интенсивно по сравнению с интерметаллидной матрицей.

Таким образом, присутствие диборида титана с одной стороны упрочняет интерметаллидную матрицу, а с другой стороны, образующиеся на его поверхности оксиды в процессе трения выполняют роль твердой смазки, что в совокупности приводит к уменьшению износа материала.

Литература

1. *Materials Issues for the Design in Industrial Gas Turbines, Advanced Materials and Processes Gas Turbines [Text]*/ M.B. Henderson, J. Hannis, G. McColvin, G. Ogle // TMS. The Minerals, Metals & Materials Society. – 2003. – P. 3 – 13.
2. Smarsly, W. *Potential of intermetallics to replace superalloys for advanced operation conditions in gas turbines [Text]*/ W. Smarsly, L. Singheiser // J. Mat. Adv. Power Eng. – 1994. – Part II. – P. 1731 – 1756.
3. *Интерметаллические соединения* / В.А. Брысин, В.В. Вавилова, С.Н. Горин [и др.]; под ред. И.И. Корнилова. – М.: Металлургия, 1970. – 440 с.

4. Darolia, R. Overview of NiAl for high temperature structural application [Text] / R. Darolia, D.F. Lahrman, R.D. Field // *Ordered Intermetallics-Physical Metallurgy and Mechanical Behavior*. – 1992. – Vol. 3. – P. 679 – 698.

5. Тамарин, Ю.А. Жаростойкие диффузионные покрытия лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / Ю.А. Тамарин. – М.: Машиностроение, 1978. – 136 с.

6. Влияние состава покрытий на основе интерметаллидов никеля на механизмы их изнашивания в условиях высокотемпературных трибоиспытаний [Текст] / А.П. Уманский, Е.Н. Полярус, А.Д. Костенко, А.Е. Терентьев // *Проблемы трибологии*. – 2012. – № 3. – С. 123 – 127.

7. Уплотнительные материалы для проточного тракта ГТД [Электронный ресурс]: ВИАМ/2012-206075 / В.П. Мигунов, Д.П. Фарафонов, М.Л. Деговец, Т.И. Ступина // *Авиационные материалы и технологии*. – июнь 2012. – 9 с. – Режим доступа: <http://viam.ru/public/files/2012/2012-206075.pdf>. – 31.05.2013.

8. Influence of CrB₂ additives into NiAl intermetallics on tribological properties of thermal spray coatings at high temperature friction [Text] / O. Umanskyi, O. Poliarus, M. Ukrainets, O. Kostenko, O. Terentyev // *Conference MET-2013: Materials, Environment, Technology*. – Latvia, Riga, June 19-20, 2013. – P. 37 – 43.

Поступила в редакцию 31.05.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Д. Панасюк, Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев.

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ПОКРИТТІВ З НИХ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ NiAl-TiB₂

О.П. Уманський, О.М. Полярус, М.С. Українець, А.Г. Довгаль, Л.М. Капітанчук, В.І. Субботин

У статті наведено результати досліджень структури та властивостей композиційних матеріалів системи NiAl-TiB₂ та покриттів з них, призначених для захисту деталей ГТД, які працюють в умовах високих температур та навантажень. Композити та покриття отримані з рівномірно розмішаної суміші порошків TiB₂ та NiAl, досліджено їх мікроструктуру та хімічний склад. Триботехнічні властивості розроблених покриттів досліджувались при T=20 та 500°C. Показано, що, оксиди, які утворюються на поверхні тертя виконують роль сухого мастила. Встановлено, що на характер та інтенсивність зношування суттєво впливає температура трибовипробувань, а також наявність армуючої боридної фази.

Ключові слова: композиційні матеріали, дисперсне армування, покриття, інтерметалід NiAl, диборид титану, трибовипробування.

THE STRUCTURE AND PROPERTIES INVESTIGATIONS OF COMPOSITE MATERIALS AND COATINGS BASED ON NiAl-TiB₂ SYSTEMS

O.P. Umanskyi, O.M. Poliarus, M.S. Ukrainets, A.G. Dovgal, L.M. Kapitanchuk, V.I. Subbotin

The results of the structure and properties studying of NiAl-TiB₂-system composite materials and coatings, which are designed to protect the operating at high temperature and loads GTE-parts were presented in this article. Composites and coatings were produced from the evenly stirred TiB₂ and NiAl powder mixture. The surface morphology and phase composition of coatings were analyzed. The tribotechnical properties at T = 20 and 500° C of the produced coatings were investigated. It was shown, that oxides, which formed on the friction surface, are the solid lubricant. The results show, that temperature and presence of a reinforcing boride phase significantly affects on the wear tests nature and intensity.

Key words: composite materials dispersed reinforcement, coating intermetallide NiAl, titanium diboride, tribotests.

Уманський Александр Павлович – д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отд., Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: kerm@voliacable.com.

Полярус Елена Николаевна – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: elena_polyarus@ukr.net.

Українець Максим Сергеевич – аспирант, Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: maximukrainets22@gmail.com.

Довгаль Андрей Григорьевич – науч. сотр., Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: 270579@ukr.net.

Капітанчук Леонид Моисеевич – науч. сотр., Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: leonkap@ukr.net.

Субботин Владимир Иванович – мл. науч. сотр., Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев, Украина.