

УДК: 621.793;669.8;621.762;669.018.45;532.696.1

О.П. Уманський¹, О.М. Полярус¹, В.М. Кисиль¹, О.У. Стельмах², Ю.І. Євдокименко¹*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України¹**Національний авіаційний університет²***ВПЛИВ СКЛАДУ МАТЕРІАЛУ, А ТАКОЖ РОЗМІРУ АБРАЗИВУ НА ТЕРМОЕРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ІНТЕРМЕТАЛІДУ NiAl**

Досліджено вплив складу матеріалу і розміру абразивних частинок на термоерозійну стійкість композиційних матеріалів на основі інтерметаліду NiAl. Вивчено структуру матеріалів після випробувань, встановлений механізм зношування. Показано, що найбільш інтенсивно процес зношування протікає при випробуванні сталевих зразків. Найбільш високі значення зносостійкості показали розроблені композиційні матеріали системи NiAl-CrB₂. Також показано, що зменшення розміру абразиву в усіх випадках призводить до зниження інтенсивності зношування матеріалів, а інтенсивність пошкоджуваності композиту, що містить 45% CrB₂ є мінімальною.

Ключові слова: композиційні матеріали, інтерметалід, NiAl, термоерозійні випробування, газоабразивний знос, структура, інтенсивність зношування.

А.П. Уманский, Е.Н. Полярус, В.М. Кисиль, А.У. Стельмах, Ю.И. Евдокименко**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА МАТЕРИАЛА, А ТАКЖЕ РАЗМЕРА АБРАЗИВА НА ТЕРМОЭРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА NiAl**

Исследовано влияния состава материала и размера абразивных частиц на термоэрозионную стойкость композиционных материалов на основе интерметаллида NiAl. Изучена структура материалов после испытаний, установлен механизм изнашивания. Показано, что наиболее интенсивно процесс изнашивания протекает при испытании стальных образцов. Наиболее высокие значения износостойкости показали разработанные композиционные материалы системы NiAl-CrB₂. Также показано, что уменьшение размера абразива во всех случаях приводит к снижению интенсивности изнашивания материалов, а интенсивность повреждаемости композита, содержащего 45% CrB₂ минимальная.

Ключевые слова: композиционные материалы, интерметаллид NiAl, термоэрозионные испытания, газоабразивный износ, структура, интенсивность изнашивания.

O. Umanskyi, O. Poliarus, V. Kysil, O. Stelmah, Yu. Evdokimenko**INFLUENCE OF MATERIAL COMPOSITION AND ABRASIVE SIZE ON THE THERMAL EROSION RESISTANCE OF COMPOSITES BASED ON NiAl INTERMETALLIC**

The influence of the material composition and the abrasive particles size on the NiAl-based composite materials thermal erosion resistance is studied. The materials structure after tests has been studied; the wear mechanism has been established. It is shown that the wear process is most intensive during the steel samples testing. The highest values of wear resistance were shown by the developed composite materials of the NiAl-CrB₂ system. It is also shown that a decrease in the abrasive particles size in all cases leads to a decrease in the wear rate of materials, and the damage rate of the composite containing 45% CrB₂ is minimal.

Keywords: composite materials, NiAl-intermetallic, thermo-erosion testing, gas-abrasive wear, structure, wear rate.

Постановка проблеми. Розробка нових конструкційних матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками являється основною задачею галузі аерокосмічного матеріалознавства.

Найбільше увагу приділяється створенню жаростійких матеріалів для захисту деталей гарячого тракту ГТД від високотемпературного окислення. Широке застосування в цій області знайшли литі сплави на основі нікеля (ЖС 26, ЖС 32), а також інтерметаліди (NiAl, Ni₃Al) [1, 2].

Враховуючи це слід звернути увагу на те, що в процесі експлуатації робочі лопатки ГТД, крім високотемпературного окислення, піддаються і ерозійному впливу різними абразивними частинками, а також продуктами сгорання.

Актуальною є задача створення нових композиційних матеріалів, які б мали в собі, крім жаростійкості, стійкість до абразивного зношування в умовах високих температур. Матеріалами, які мають такий комплекс властивостей, можуть бути розроблені в ІПМ композити на основі інтерметаліда NiAl, упрочнені тугоплавкими частинками CrB₂, TiB₂, ZrB₂ [3-9]

Метою даної роботи є дослідження впливу складу матеріалу і розміру абразивних частинок на термоерозійну стійкість композитів на основі інтерметаліда NiAl.

Экспериментальная часть. Термоабразивные испытания проводили в высокоскоростной струе продуктов сгорания, несущей частицы абразива, генерируемой сверхзвуковым двухфазным горелочным устройством ГВО-2М с диаметрами критического и выходного сечений 11 мм и 15 мм соответственно, работающим на топливной паре керосин-воздух. Давление в камере сгорания устройства было 0,8 МПа при коэффициенте избытка окислителя – $\alpha = 1,5$. Дистанция от среза сопла до поверхности образца составляла 190 мм. Натекание струи было под углом 90° к поверхности. Испытания проводили путем многократного перемещения пакета образцов через пятно воздействия двухфазного высокоскоростного потока со скоростью 75 мм/с. Все четыре образца испытывали одновременно одним пакетом, чтобы обеспечить идентичность условий эксперимента. Для избегания краевых эффектов по краям пакета устанавливались дополнительные пластины того же размера. Температура поверхности образцов в момент нахождения в пятне воздействия измерялась пирометром INFRATHERM Converter IGA 100 (IMPAC Electronic GmbH, ФРГ (диапазон измеряемых температур 350...1800 °С, длина волны $\lambda=1,45...1,8 \mu\text{м}$) с частотой 1 Гц. В испытаниях в качестве абразива был использован порошок карбид кремния SiC дисперсностью (–500+250) и (–125+80) мкм.

В качестве материалов для проведения исследований использовали сплав ЖС 26, нержавеющую сталь 12X18Н10Т, композиты системы NiAl-CrB₂. Образцы представляли собой параллелепипеды. Для установления влияния количества добавок диборида хрома в NiAl на характеристики высокотемпературной эрозионной стойкости из горячепрессованных при T=1350 °С компактных композиционных материалов NiAl-15 (45) вес.% CrB₂ были изготовлены образцы размерами 5*10*25 (мм)

Потерю массы при термоэрозионных испытаниях оценивали весовым методом в граммах на лабораторных весах ВЛР-200 с точностью $\pm 0,5$ мг. Микроструктуру образцов после испытаний исследовали с помощью растрового электронного микроскопа РЕМ–106 И.

Результаты и обсуждение Проведенные исследования показали (рис. 1), что наиболее интенсивно процесс изнашивания протекает при испытании стальных образцов. Потеря массы образцов составила 0,73 г при использовании абразива размером (–500+250) мкм и 0,52 г при использовании абразива (–125+80) мкм. Интенсивность изнашивания сплава ЖС 26 несколько меньше по сравнению со сталью и составляет 0,52 г и 0,35 г соответственно.

Наиболее высокие значения износостойкости показали разработанные композиционные материалы системы NiAl-CrB₂. Причем, для этих материалов наблюдается следующая тенденция: с увеличением объема тугоплавких включений снижается интенсивность изнашивания. Так, для композиционного материала содержащего 15% вес.% CrB₂ величины изнашивания составляют 0,41 г при абразиве размером (–500+250) мкм и 0,26 г при абразиве (–125+80) мкм, а для композита NiAl-15 (45) вес.% CrB₂ – 0,28 г и 0,17 г соответственно.

В целом, величина износа разработанных композиционных материалов в 1,5-2 раза меньше по сравнению со стальным образцом и сплавом ЖС 26.

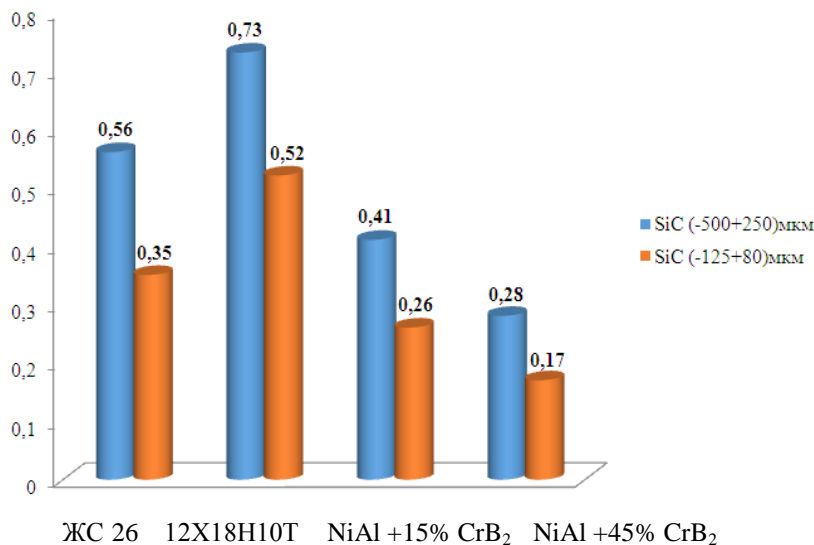


Рис. 1. - Интенсивность изнашивания материалов после высокотемпературного газоабразивного износа (T=500°C, абразив SiC (–500+250) и (–125+80) мкм, угол атаки $\Theta=90^\circ$)

Результаты интенсивностей изнашивания подтверждаются металлографическими исследованиями. Микроструктура материалов после испытаний состоит из матрицы, которая соответствует исходным образцам и включений частиц абразива (рис.2-4).

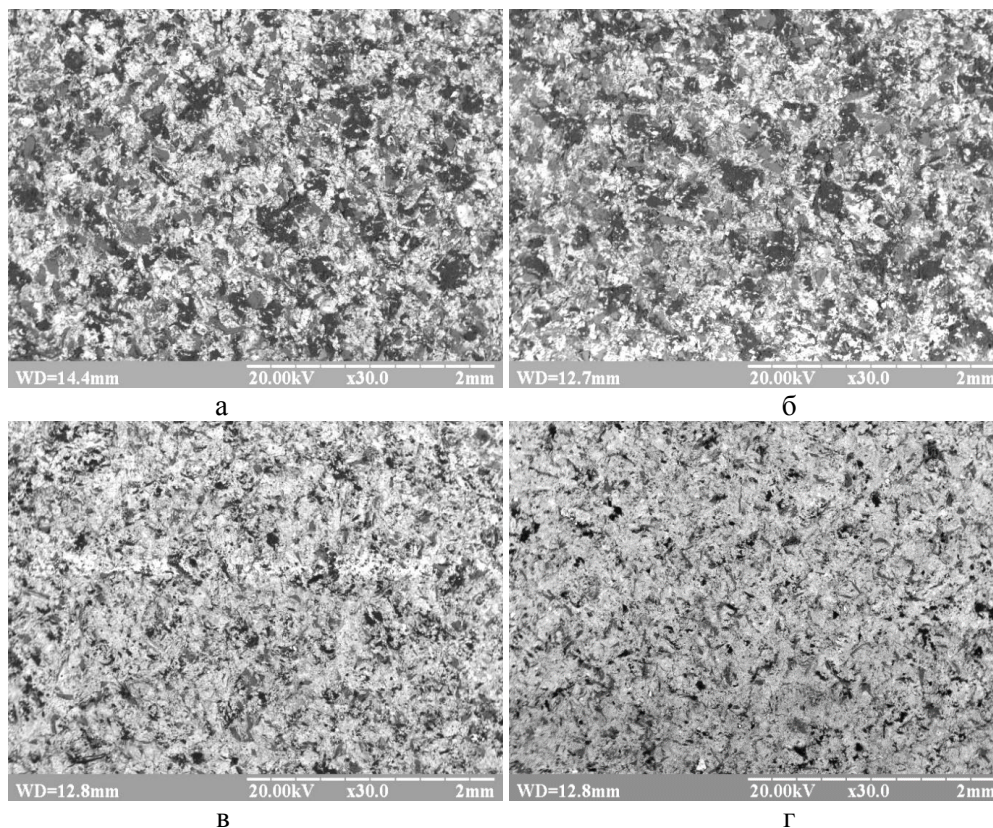


Рис. 2. - Микроструктура поверхностей материалов после высокотемпературного газоабразивного износа ($T=500^{\circ}\text{C}$, абразив SiC ($-500+250$) мкм, угол атаки $\Theta=90^{\circ}$): а – нержавеющая сталь 12X18H10T; б – сплав ЖС 26; в – г/п КМ NiAl +15% CrB₂; г – г/п КМ NiAl +45% CrB₂

На представленных структурах образцов после испытаний абразивом ($-500+250$) мкм (рис.2-3) отчетливо видны темно-серые включения абразивных частиц карбида кремния, внедренных в поверхность материалов. Прослеживается корреляция между количеством внедренных абразивных частиц и результатами интенсивности изнашивания соответствующих материалов: таких включений (темно-серой фазы) в испытанных сплавах ЖС 26 и 12X18H10T значительно больше, чем в разработанных композитах.

Следует также отметить и тот факт, что структуры материалов после испытаний отличаются не только количеством включений, но и их размерами (рис. 2-3). Сплавы ЖС 26 и 12X18H10T после испытаний имеют идентичную структуру, для которой характерно внедрение крупных частиц карбида кремния в пластичную матрицу (рис.3). Размер таких включений варьируется от 60 до 160 мкм. Согласно МРСА на поверхности исследуемых сплавов фиксируются 2 основные фазы: на основе железа (рис.3-а, фаза 1) и SiC (рис.3-а, фаза 2) – для стального образца и фазы на основе никеля (рис.3-б, фаза 3) и SiC (рис.3-а, фаза 2) – для сплава ЖС 26. Также обнаружены участки скопления продуктов сгорания и износа в виде оксидов (рис.3-а, фаза 4).

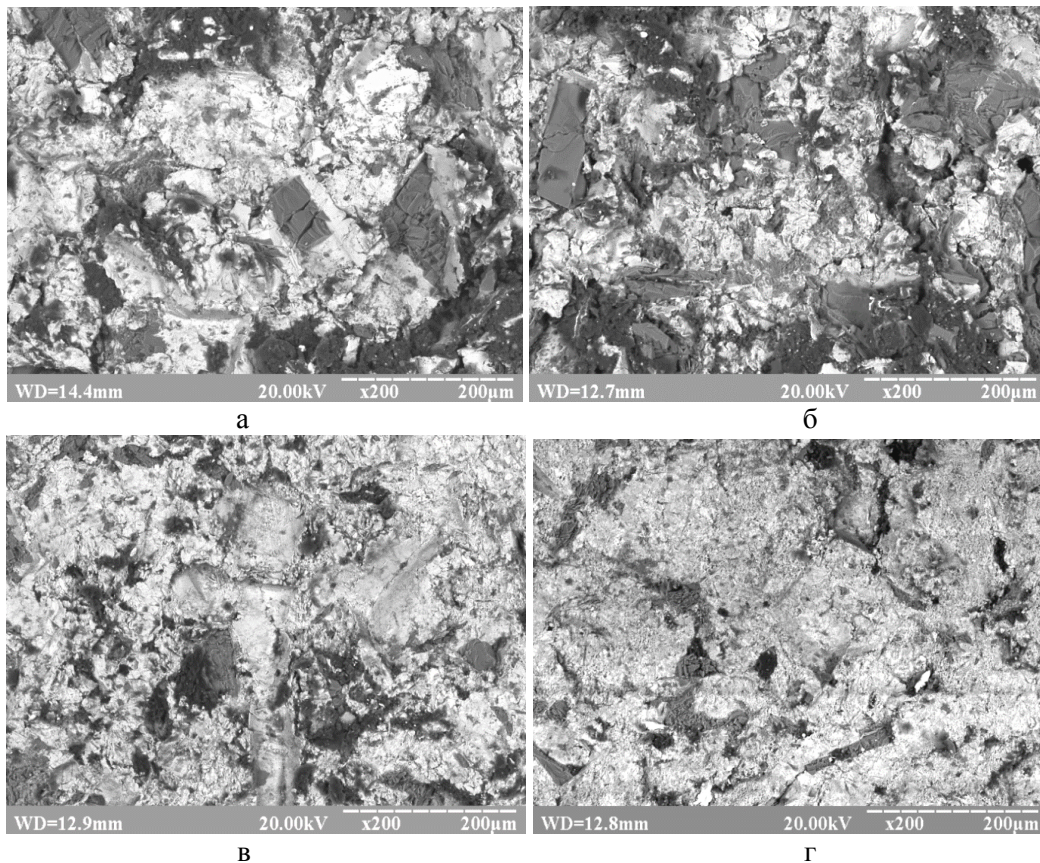
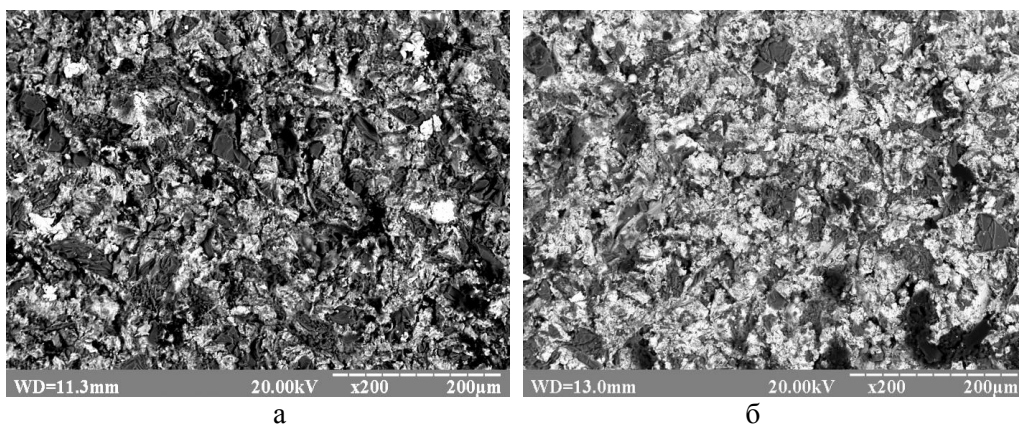


Рис. 3. - Микроструктура и результаты МРСА поверхностей материалов после высокотемпературного газоабразивного износа ($T=500^{\circ}\text{C}$, абразив SiC (-500+250 мкм), угол атаки $\Theta=90^{\circ}$): а – нержавеющая сталь 12X18H10T; б – сплав ЖС 26; в – г/п КМ NiAl +15% CrB₂; г – г/п КМ NiAl +45% CrB₂

Для разработанных композиционных материалов NiAl +15% CrB₂ и NiAl +45% CrB₂ наблюдается внедрение значительно меньшего количества частиц абразива, а их размер составляет 20-80мкм.

После испытаний образцов в двухфазном высокоскоростном потоке с использованием абразива размером (-125+80) мкм (рис.4) наблюдается такая же тенденция деградации поверхности в ряду «металлический сплав → композит NiAl +15% CrB₂ → композит NiAl +45% CrB₂», как и при испытании абразивом (-500+250) мкм.

Уменьшение размера абразива во всех случаях приводит к снижению интенсивности изнашивания материалов (рис.1), а интенсивность повреждаемости композита, содержащего 45% CrB₂ минимальная (рис.4).



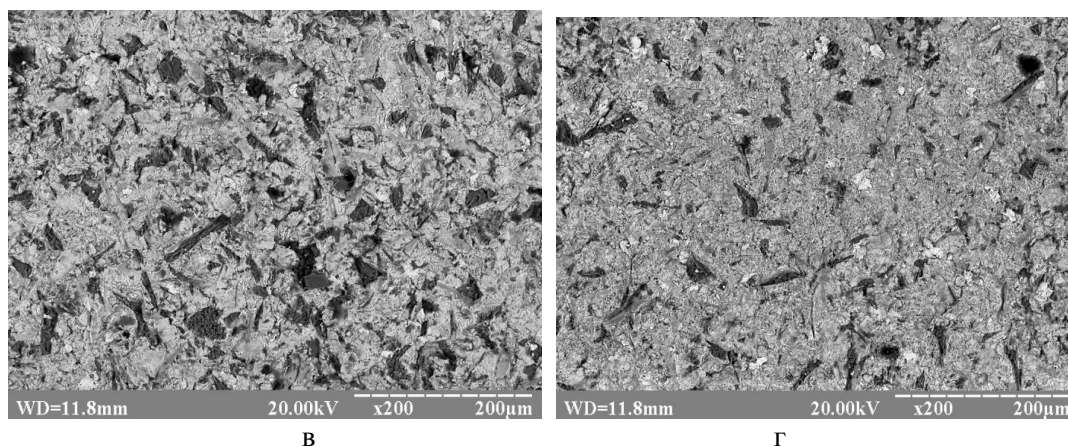


Рис. 4. - Микроструктура поверхностей материалов после высокотемпературного газоабразивного износа ($T=500^{\circ}\text{C}$, абразив SiC ($-125+80$ мкм), угол атаки $\Theta=90^{\circ}$): а – нержавеющая сталь 12X18H10T; б – сплав ЖС 26; в – г/п КМ NiAl +15% CrB₂; г – г/п КМ NiAl +45% CrB₂

Механизм изнашивания никелевого сплава и стали можно описать следующим образом: под воздействием потока абразивных частиц карбида кремния наблюдается эрозия материалов ЖС 26 и 12X18H10T соответственно. Кроме того, за счет высокой кинетической энергии абразива, а также действия высоких температур, частицы SiC внедряются в пластичную матрицу. При многократном проходе потока твердых абразивных частиц по поверхности происходит их частичное разрушение и выкрашивание. Совокупность этих процессов приводит к существенной потере массы и, как следствие, к более высокой интенсивности износа (рис.1).

В отличие от материалов ЖС 26 и 12X18H10T, внедрение частиц карбида кремния в поверхность композиционных материалов NiAl +15% CrB₂ и NiAl +45% CrB₂ значительно меньше за счет наличия тугоплавких включений. Наличие боридных зерен препятствует внедрению абразивных частиц в материал при их столкновении с поверхностью композита.

Структурные исследования показали, что внедрение абразивных частиц SiC происходит на тех участках поверхности, где, из-за локальной сегрегации, отсутствуют боридные зерна, то есть абразивные частицы могут внедряться в NiAl между боридными включениями.

Очевидным в этом случае является то, что композиты, содержащие большее количество боридных зерен (45%) содержат значительно меньше включений карбида кремния, а износостойкость такого материала самая высокая.

Выводы. В статье исследовано влияния состава материала и размера абразивных частиц на термоэрозионную стойкость композитов на основе интерметаллида NiAl. Показано, что наиболее интенсивно процесс изнашивания протекает при испытании стальных образцов. Наиболее высокие значения износостойкости показали разработанные композиционные материалы системы NiAl-CrB₂. Также показано, что уменьшение размера абразива во всех случаях приводит к снижению интенсивности изнашивания материалов.

Установлено, что величина износа разработанных композиционных материалов в 1,5-2 раза меньше по сравнению со стальным образцом и сплавом ЖС 26. При этом интенсивность повреждаемости композита, содержащего 45% CrB₂ минимальная.

Список использованных источников:

1. П.Д. Жеманюк, В.В. Клочихин, Н.А. Лысенко, В.В. Наумик. Структура и свойства литых лопаток авиационных двигателей из жаропрочного никелевого сплава ЖС26-ВИ после горячего изостатического прессования // Вестник двигателестроения. – №1. – 2015. – С. 139-146.
2. В. П. Бунтушкин, О.А. Базылева, В.И. Буркина. Высокотемпературные жаропрочные сплавы на основе интерметаллида Ni₃Al для деталей горячего тракта ГТД // Авиационная промышленность. – №2. – 2007.
3. Уманский А. П., Полярус Е. Н., Костенко А.Д., Украинец М.С. Влияние добавок тугоплавких боридов на механизмы изнашивания плазменных покрытий на основе интерметаллида NiAl // Проблемы трибологии. – 2014. – № 1. – С. 46-52.

4. Уманский А. П., Полярус Е. Н., Украинец М. С., Капитанчук Л. М. Структура и триботехнические характеристики композиционных материалов и покрытий из них на основе системы NiAl-CrB₂ // Порошковая металлургия. – 2015. – № 1/2. – С. 65-73.
5. Уманский А. П., Полярус Е. Н., Украинец М. С., Марценюк И. С., Субботин В. И. Исследование структуры, физико-химических свойств и триботехнических характеристик композиционных материалов системы NiAl-ZrB₂ // Сверхтвердые материалы. – 2015. – № 4. – С. 53-62.
6. O. Umanskyi, O. Poliarus, M. Ukrainets, M. Antonov. Physical-Chemical Interaction in NiAl-MeB₂, Systems Intended for Tribological applications // Welding Journal. – July 2015. – P. 225-230.
7. М. С. Українець, О. П. Уманський, О. М. Полярус, О. В. Куцев, О. У. Стельмах. Вплив температури випробувань на триботехнічні характеристики композиційних покриттів системи NiAl-CrB₂ // «Наукові нотатки». – 2013. – № 41. – Ч. 2. – С. 206-212.
8. А. П. Уманский, Е. Н. Полярус, М. С. Украинец, А. Г. Довгаль, Л. М. Капитанчук, В. И. Субботин. Исследование структуры и свойств композиционных материалов и покрытий из них на основе системы NiAl-TiB₂ // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 10 (107). – С. 20-24.
9. O. Umanskyi, O. Poliarus, M. Ukrainets, I. Martsenyuk. Effect of ZrB₂, CrB₂ and TiB₂ Additives on the Tribological Characteristics of NiAl-Based Gas-thermal Coatings // Key Engineering materials. Vol. 604 (2014). – P. 20-23.

Рецензенты:

Тамаргазин А.А., зав.кафедры технологий аэропортов НАУ, д.т.н., проф;

Коновал В.В., с.н.с. Института проблем материаловедения НАН Украины, к.т.н., с.н.с.

Стаття надійшла до редакції 29.04.2017