

Аренсбургер, С. М. Зимаков, П. А. Кулу // Порошковая металлургия. – 2001. – №3/4. – С. 38–47.

2. Астахов Е. А. Исследование процесса фазообразования при детонационном напылении композиционных порошков системы FeTi-SiC/ Е. А. Астахов, И. В. Миц // Порошковая металлургия. – 2005. – №1/2. – С. 67–73.

3. Декл. пат. на кор. мод. 65010 України. Композиційних зносостійкий матеріал на основі Cr-Si-B для поверхневого зміцнення деталей; С22С 29/14 / С.Д. Недаїборщ, В.В. Щепетов, О.В. Харченко та ін. - № u 2011 04995; Заявл. 20.04.2011; Опубл. 25.11.2011, Бюл. №22. – 4 с.

4. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И.Костецкий, И.Г.Носовский, А.К.Караулов и др.// – К.: Техника. – 1976. – 296 с.

References

1. Arensburger D. S. Pokrytija napyljaemye vysokoskorostnym gazotermicheskim metodom / D. S. Arensburger, S. M. Zimakov, P. A. Kulu // Poroshkovaja metallurgija. – 2001. – №3/4. – С. 38–47.

2. Astahov E. A. Issledovanie processa fazoobrazovanija pri detonacionnom napylenii kompozicionnyh poroshkov sistemy FeTi-SiC/ E. A. Astahov, I. V. Mic // Poroshkovaja metallurgija. – 2005. – №1/2. – С. 67–73.

3. Dekl. pat. na kor. mod. 65010 Ukraїni. Kompozicijnih znosostijikij material na osnovi Cr-Si-B dlja poverhneвого zmцennnja detalej; S22S 29/14 / S.D. Nedajborshh, V.V. Shhepetov, O.V. Harchenko ta in. - № u 2011 04995; Zajavl. 20.04.2011; Opubl. 25.11.2011, Bjul. №22. – 4 s.

4. Kosteckij B.I. Poverhnoznaja prochnost' materialov pri trenii / B.I.Kosteckij, I.G.Nosovskij, A.K.Karaulov i dr.// – К.: Tehnika. – 1976. – 296 s.

Рецензія/Peer review : 7.10.2013 р. Надрукована/Printed :21.11.2013 р.
Рецензент: Гордеев А.І., д.т.н., проф.

УДК 620.178:621.793(045)

Е.В. ХАРЧЕНКО

Национальный авиационный университет, г.Киев

С.С. БЫСЬ

Хмельницкий национальный университет

ТРИБОСТОЙКОСТЬ ДЕТОНАЦИОННЫХ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ZR-AL-B ПРИ НАГРУЖЕНИИ ТРЕНИЕМ

Приведены результаты экспериментальных исследований изнашивания и характер ее зависимости от скорости скольжения при испытании покрытий в отсутствие смазки. Современными методами физико-химического анализа установлено, что аморфно-кристаллическая композиция, обладающая высокими механическими свойствами, характеризуется значительным сопротивлением износу, которое не уступает таковым значениям вольфрамсодержащих твердых сплавов типа ВК15, и является перспективным конкурентоспособным материалом при создании трибостойких покрытий.

Ключевые слова: аморфно-кристаллические материалы, трибостойкость, детонационно-газовое напыление, интенсивность изнашивания.

ELENA KHARCHENKO

National Aviation University, Kyiv

SERGEI BYS

Khmelnysky National University

TRIBOSTABILITY DETONATION AMORPHOUS-CRYSTALLINE COATING ZR-AL-B UNDER LOADED FRICTION

Abstract – *The research is aimed at a comprehensive study of the strength and anti-friction characteristics of the amorphous-crystalline coatings in various extreme conditions to improve the understanding of the technical and economic potential and realize their operational properties in the finished product.*

Analysis of test results coatings whose structure contains amorphous and crystalline phases can be concluded that amorphous-crystalline composition for the optimal combination of its components, has a high surface strength, wear resistance and satisfactory workability during the study.

The experimental results of wear and character of its dependence on the sliding velocity in the test surfaces in the absence of lubrication. Modern methods of physical-chemical analysis revealed that the amorphous- crystalline composition having high mechanical properties is characterized by considerable resistance to wear, which is not inferior to those values tungsten carbide type BK15, and is a promising material for the creation of competitive tribostable coatings.

Keywords: amorphous-crystalline materials, tribostability, detonation-gas spraying, wear intensity

Вступлення. Прикладні результати досліджень сучасних триботехнічних изысканий обуславлюють рівень розвитку сучасної техніки. Сьогодні однією з найбільш динамічно розвиваючихся технологій, відзначеної ростом наукового, промислового і комерційного інтереса, є розробка і створення аморфізованих конструкційних матеріалів і покриттів, застосування яких сприяє значительному підвищенню ітогового показателя якості, а іменно економічної ефективності, як в сфері виробництва, так і експлуатації. Актуальність проблеми виробництва аморфно-кристалічних матеріалів визначається здатністю їх отримання з якісно і кількісно новими експлуатаційними

характеристиками, что обуславливает необходимость изучения новых логически упорядоченных закономерностей структурообразования как объективной формы получения адекватных знаний в интересах создания конструкционных аморфизированных материалов и покрытий.

Цель работы: Изложение результатов экспериментальных исследований сопротивления износу разработанных аморфно-кристаллических покрытий, напыленных детонационно-газовым методом композиционными порошками Zr-Al-B, в отсутствие смазки при монотонном увеличении скорости и скольжения и постоянной нагрузке.

Методика исследований. За основу исследований были приняты общие технические требования методики испытания на износостойкость материалов в условиях отсутствия смазки, изложенные в работе [1]. Покрытия наносили на модернизированной детонационной установке „Днепр-3”, толщина после доводки составляла 0,15–0,20 мм при шероховатости $R_a=0,63-0,32$. Для сравнения по аналогичным программам были также испытаны детонационные покрытия, напыленные как вольфрамсодержащим порошком типа BK15, так и порошками на основе никеля, легированного хромом, алюминием и бором. Испытания на износ осуществляли на установке типа УМТ-1 на модельных кольцевых образцах из термообработанной стали 45 ($D_{\text{дв}}=25 \times 17,5$) в условиях распределенного контакта ($K_{\text{вз}} \approx 1$) при скорости скольжения до 1,5 м/с и нагрузке 5,0 МПа.

Достоверность взаимосвязи между структурой и свойствами покрытий, необходимых для контроля их качества, во многом зависит от выбора методов исследования и применяемых методик. Рентгенофазовый анализ покрытий осуществляли с помощью дифрактометра „Дрон-УМ1” (Co – излучение, напряжение 25 кВ, ток 15 мА). Исследование поверхностного слоя, в котором протекают процессы активизации при трении, влияющие на ведущий вид изнашивания, осуществлялись методами зондовой растровой электронной микроскопии на установке „Самскап” (ускоряющее напряжение 25 кВ, ток пучка 200 мА). Для химического анализа поверхностных структур, зон локализации их составляющих, использовалась программа ZAF-L/FLS, также с целью изучения состояния поверхности трения использован метод дифракции электронов. Исследования проводились на электронографе типа ЭРМ-100. Металлографические исследования проводили на микроскопе МИМ-8 и микротвердомере типа ПМТ-3 (нагрузка 0,5Н).

Результаты исследований и обсуждения результатов. Одним из современных методов получения аморфно-кристаллических материалов остаются постоянно совершенствующиеся технологии газотермического напыления [2]. Триботехнические испытания аморфных покрытий близкого фазового состава, полученных различными методами газотермического напыления, показали, что наиболее высокой износостойкостью обладают детонационные покрытия [3]. В работе [4] экспериментально установлены технологические параметры, определяющие возможность получения аморфизированных покрытий, при этом подчеркнута, что детонационно-газовое напыление не только создает оптимальные условия получения около эвтектических составов в метастабильном состоянии, но и имеет ряд преимуществ перед традиционными способностями скоростного охлаждения.

В таблице 1 представлены результаты исследований механических свойств детонационных покрытий на основе циркония, содержащих мелкодисперсные частицы кристаллических тугоплавких боридов и алюминидов [5].

Таблица 1

Механические свойства покрытий Zr-Al-B

СОДЕРЖАНИЕ КОМПОНЕНТОВ, %			E, Н/ММ	Σ_T , Н/ММ ²	M	HV, МПА
ZR	AL	B				
80	10	5	173900	4070	2,21	1350
70	15	8	181800	4250	2,27	1410
60	20	10	195300	4950	3,10	1620

Были проведены исследования, методика которых изложена в [6], они заключались в определении предела текучести (σ_T) по углу остаточного изгиба плоских образцов с напыленным покрытием, при этом было установлено наличие деформационного упрочнения. Степень упрочнения (m) определялась согласно [7]. В случае линейной зависимости для аморфных материалов $m < 2,5$, т.е. прирост σ_T не должен превышать 2,5% при увеличении степени пластической деформации на 1%. В таблице 1 приведены значения m , рассчитанные для испытываемых покрытий. Анализ данных, приведённых в таблице, показывает, что твёрдость покрытий при уменьшении содержания Zr увеличивается, а алюминия (одновременно с B) – резко возрастает. При этом введение до 20% Al и 10% B повышают значение σ_T , модуль Юнга и коэффициент деформационного упрочнения также растёт и превосходит предельные значения для аморфных сплавов ($E=180000$ Н/мм² и $m=2,5$), что подтверждает присутствие в структуре кристаллических соединений [8].

Результаты исследований интенсивности изнашивания и характер ее зависимости от скорости скольжения при испытании покрытий представлены на рис.1. Для исследования характера и закономерностей структурных изменений, обуславливающих высокое сопротивление изнашиванию покрытий системы Zr-Al-B (кривая 3) было изучено распределение элементов по толщине напыляемого слоя. Анализ проводили при диаметре зонда 2 и 10 мкм, полученные с помощью прямых методов результаты, показали наличие диффузионной зоны порядка 25 мкм и переменную по сечению концентрацию элементов, входящих в состав покрытия, и позволили классифицировать структуру как тонкий конгломерат фаз. При сопоставлении отпечатков, снятых в поглощенных электронах и в рентгеновских лучах, не представлялось возможным однозначно отождествить полученную структуру, и для нее характерно наличие неоднородностей, как установлено, с размерами порядка 2-4 мкм. Получены расхождения в химическом составе, подтверждают наличие неравновесной дисперсной структуры, что совпадает с современными представлениями о природе аморфных и аморфно-кристаллических композитов [9]. Количество аморфной фазы в покрытии составляет до 82%.

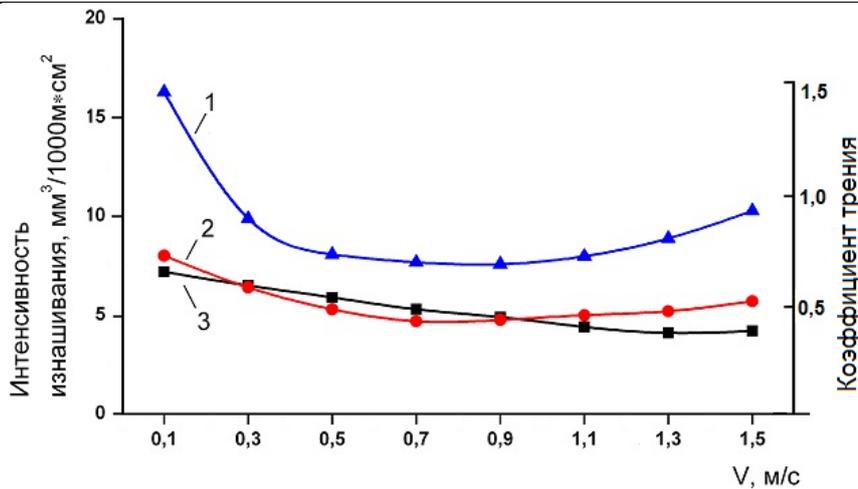


Рис. 1. Зависимость интенсивности изнашивания и коэффициента трения от скорости скольжения покрытий: 1 – на основе Ni (Ni-Cr-Al-B); 2 – типа ВК15; 3 – аморфно-кристаллической системы Zr-Al-B

По данным рентгеновского анализа состав покрытий отличается от состава напыляемого порошка и в первую очередь за счет фазовых превращений в результате взаимодействия компонентов в условиях охлаждения и представляет пересыщенный α -твердый раствор на основе Zr с ультратонкими включениями боридов типа ZrB_2 , AlB_2 и алюминидов Zr_2Al . Следует отметить, что к аморфизации склонны системы у которых соединения плавятся конгруэнтно и имеют узкую область гомогенности, при этом возможность получения аморфного состояния тем больше, чем выше температура аморфизации и ниже температура плавления (в данном случае $\approx 435^\circ\text{C}$ и $\approx 1980^\circ\text{C}$ соответственно).

Согласно спектрам микрорентгеновского анализа в поверхностном слое присутствуют как простые оксиды типа Al_2O_3 , ZrO так и сложные типа Zr_2AlO_4 , а также соединения борного ангидрида B_2O_3 , способствующие образованию вязкой плотной „глазури” на основе метабората циркония $\text{Zr}(\text{BO}_2)_2$.

Износостойкость покрытия (кривая 3) практически во всем диапазоне скоростей достигает величин соизмеримых со значениями сопротивления износу покрытия ВК15 (кривая 2). Высокая износостойкость, по нашему мнению, обусловлена пассивацией как за счет аддитивной направленности свойств поверхностных оксидных структур, так и в результате твердофазных реакций под действием локальных температур и давления, обуславливающих образование ультрадисперсных химических соединений компонентов, входящих в состав покрытия. На рис. 2. представлены поверхность трения и электронограмма покрытий на основе Zr. Рабочая поверхность (рис. 2а.) отличается развитым субрельефом при отсутствии трещин, задиры, что характерно для теоретически неизбежного и практически допустимого механохимического износа. Приведенная электронограмма от поверхности трения (рис. 2б.) фиксирует достаточно интенсивное гало и размытие кольца меньшей яркости, что характерно для аморфных структур.

Согласно структурно-энергетическим положениям трения, полученная в следствии структурной приспособляемости поверхностная пленка представляет ультрадисперсную ориентированную метастабильную структуру, близкую к составу дисперсноупрочненных композиций, для которых характерно проявление высокой пластичности и прочности в широком и устойчивом структурно-временном диапазоне. Исходя из этого, можно утверждать, что если структура может приспособляться в данных условиях трения, то это обязательно произойдет, точнее, если существует какое-либо распределение поверхностных структур, соответствующее состоянию приспособляемости, то система приспособится, и параметры трения будут минимальны.

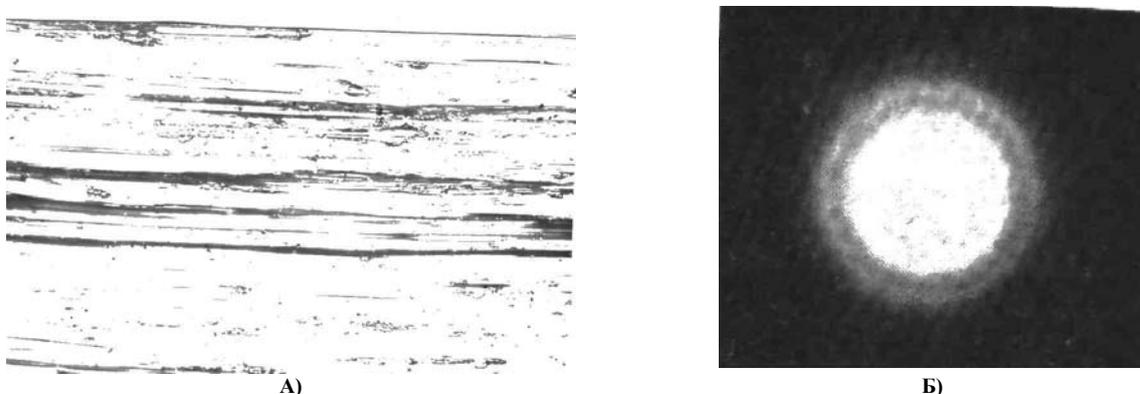


Рис. 2. Поверхность трения (а) и электронограмма покрытия Zr-Al-B (б) испытанного при $V=1,3$ м/с ($P=5,0\text{МПа}$)

Выводы. Таким образом, анализ результатов испытаний покрытий, в структуре которых содержатся аморфные и кристаллические фазы, позволяет сделать вывод, что аморфно-кристаллическая композиция при оптимальном сочетании составляющих ее компонентов, обладает высокой поверхностной прочностью, износостойкостью и удовлетворительной работоспособностью в ходе всего исследования.

В заключении отметим, что дальнейшие исследования направлены на всестороннее изучение прочностных и антифрикционных характеристик аморфно-кристаллических покрытий в различных экстремальных условиях, с целью расширить представления о технико-экономических возможностях и реализации их эксплуатационных свойств в готовых изделиях.

Литература

1. Носовский И.Г., Щепетов В.В., Марчик В.Е. Детонационные покрытия для защиты узлов трения от изнашивания // Наука і оборона. К.: Варта. – 1999.-с.126-135.
2. Ющенко К.А. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – К.: Наукова думка, 2007-557с.
3. Астахов Е.А. Влияние детонационных покрытий на механические свойства изделий// Автоматическая сварка.-2004-№6-с.56-58.
4. Харченко Е.В. Технологические факторы формирования аморфных детонационных покрытий системы Zr-Al-B // МНТК «Авиа-2009».-К.:НАУ,2010.-с.45-48.
5. Декл. пат. на кор. мод. 82902 України. Зносостійкий аморфний матеріал на основі цирконію; С22С 9/01 / О.В. Харченко, В.В. Щепетов, М.С.Яковлева, та ін. - № у 2012 14550; Заявл. 19.12.2012; Опубл. 27.08.2013, Бюл. №16. – 4 с.
6. Kimura H., Masumoto T., Fabrication applications – oriented properties of amorphous metal matrix composites//Sci. repts. Res.Inst. – Tohoku Univ. 2001.№2.-р.248-266.
7. Утиевская О.Л., Молотилов В.Б. Механические свойства аморфных сплавов// Металлофизика.-1993,№3.-с.28-45.
8. Общетехнический справочник /Под ред. Е.А. Скороходова – 2е изд.-М.: Машиностроение, 1990.-415с.
9. Белоцкий А.В., Куницкий Ю.А. Структура и свойства быстрозакалённых сплавов.-К.: КПИ, 2002.-130с.

References

1. Nosovskij I.G., Shhepetov V.V., Marchik V.E. Detonacionnye pokrytija dlja zashhity uzlov trenija ot iznashivaniya // Nauka i oborona. K.: Varta. – 1999.-s.126-135.
2. Jushhenko K.A. Inzhenerija poverhni / K.A. Jushhenko, Ju.S. Borisov, V.D. Kuznecov, V.M. Korzh. – K.: Naukova dumka, 2007-557s.
3. Astahov E.A. Vlijanie detonacionnyh pokrytij na mehanicheskie svojstva izdelij// Avtomaticheskaja svarka.-2004-№6-s.56-58.
4. Harchenko E.V. Tehnologicheskie faktory formirovaniya amorfnyh detonacionnyh pokrytij sistemy Zr-Al-B // MNTK «Avia-2009».-K.:NAU,2010.-s.45-48.
5. Dekl. pat. na kor. mod. 82902 Ukraїni. Znosostijkiy amorfniy material na osnovi cirkoniju; S22S 9/01 / O.V. Harchenko, V.V. Shhepetov, M.S.Jakovleva, ta in. - № u 2012 14550; Zajavl. 19.12.2012; Opubl. 27.08.2013, Bjul. №16. – 4 s.
6. Kimura H., Masumoto T., Fabrication applications – oriented properties of amorphous metal matrix composites//Sci. repts. Res.Inst. – Tohoku Univ. 2001.№2.-p.248-266.
7. Utietskaja O.L., Molotilov V.B. Mehanicheskie svojstva amorfnyh splavov// Metallofizika.-1993,№3.-s.28-45.
8. Obshhetehnicheskij spravochnik /Pod red. E.A. Skorohodova – 2e izd.-M.: Mashinostroenie, 1990.-415s.
9. Belockij A.V., Kunickij Ju.A. Struktura i svojstva bystrozakaljonnyh splavov.-K.: KPI, 2002.-130s.

Рецензія/Peer review : 22.10.2013 р. Надрукована/Printed :21.11.2013 р.

Рецензент: Гордєєв А.І., д.т.н., проф.