

## СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗНОСУ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ CR-SI-B В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ

*Рассмотрены закономерности формирования детонационных покрытий Cr-Si-B. Показано влияние технологических параметров напыления на формирование износостойких покрытий, способных сохранять эксплуатационные свойства в экстремальных условиях трения. Рассмотрены состав, структура и триботехнические свойства покрытий и их зависимость от скорости, давления, температуры.*

*Ключевые слова: детонационные покрытия, износостойкость, вторичные структуры, твердость, прочность, скорость, давление, температура.*

S.D. NEDAYBORSCH  
The State Enterprise "Plant 410GA"  
S.S. BYS  
Khmelnysky National University

### THE WEAR RESISTANCE OF DETONATION COATINGS CR-SI-B IN EXTREME CONDITIONS OF FRICTION

*Abstract – The characteristics of the formation of detonation coatings Cr-Si-B. Shows the effect of process parameters deposition on the formation of wear-resistant coatings, capable of maintaining performance in extreme conditions of friction. Examined, composition and the tribological properties of the coatings and their dependence on the speed, pressure and temperature.*

*It is shown that the wear resistance of detonation coatings Cr-Si-B working in extreme conditions, the friction caused by stable expression of the structural adaptability due to friction in the process of forming ultrafine with oriented structure, secondary structures that act as solid lubricants in the circumstances of friction.*

*From the energy point of view this transformation secondary structures can be regarded as adequate basic adaptation mechanisms in the surface layers of the friction structural adaptability.*

*Thus, coatings Cr-Si-B have a high performance friction in the absence of lubrication over a wide load- speed and temperature range of external influences, and can be recommended for protection under extreme tribological conditions of friction.*

*Keywords: detonation coverings, secondary structure, hardness, strength, speed, pressure and temperature.*

**Вступлення.** Сохранение износостойкости и длительной прочности пар трения приобретает особую актуальность в связи с необходимостью обеспечения их надежной работы в особых – экстремальных условиях, когда применение обычных традиционных материалов мало эффективно. К таким условиям относятся и трение без жидких смазочных материалов.

Одним из наиболее эффективных и экономичных проверенных временем направлений повышения долговечности деталей, работающих в условиях контактного изнашивания, является создание на трущихся поверхностях износостойких покрытий. Технология и свойства покрытий зависят от условий эксплуатации деталей, их значения, преобладающего вида изнашивания, величин допустимого износа или зазоров.

Среди многочисленных методов упрочняющих технологий, нашедших широкое применение в практике, использование детонационных покрытий для защиты рабочих поверхностей быстроизнашивающихся деталей является весьма эффективным способом повышения сроков их службы [1, 2]. В тоже время вопросы целесообразного выбора материалов покрытий для поверхностного упрочнения в зависимости от условий эксплуатации, как и вопросы определения оптимальных областей их технико-экономического применения и технологических особенностей напыления, еще недостаточно освещены.

**Целью работы** являются результаты исследования закономерности трения и изнашивания разработанных покрытий Cr-Si-B, полученных детонационно-газовым методом и испытанных без смазки в условиях повышенных нагрузочно-скоростных и температурных воздействий.

**Методика исследований.** Испытания проводили на универсальной машине трения типа УМТ-2, наносили покрытия на модернизированной установке для детонационного напыления „Днепр-3” на кольцевые образцы из термоупрочненной стали 45, толщиной 0,20-0,25 мм и шероховатостью  $R_a=0,63-0,32$ .

Раскрытие взаимосвязи между свойствами материалов в экстремальных условиях трения, их структурой, влиянием внешних факторов, определяющих надежность и работоспособность трибосистем, обусловлено ведущей ролью физико-химических методов анализа при исследовании их рабочих поверхностей. Рентгенофазовый анализ испытанных покрытий осуществлялся с помощью дифрактометра „Дрон-УМ1”. Съемка проводилась с использованием Со – излучения, напряжением 25 кВ, ток 15 мА. Изучение физико-химических свойств и микрофазовый анализ проводили на электронном сканирующем микроскопе „Camscan”. Для химического анализа вторичных структур использовалась программа ZAF-4FLS. Металлографические исследования выполняли на микроскопе МИМ-8 и микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н.

**Результаты исследований и обсуждения результатов.** Обоснованный выбор оптимальной композиции Cr-Si-B [3] для напыления износостойких покрытий оказывает основное влияние на закономерности проявления структурной приспособляемости, обуславливает условия минимизации показателей трения, и определяет работоспособность трибосопряжений в экстремальных условиях.

Для определения, оптимального содержания кремния, на основу напыляли композиционный материал Cr-Si с разным процентным содержанием Si, затем определяли микротвердость полученных покрытий. Характер

изменения микротвердости в зависимости от содержания Si показан на рис. 1. Наибольшую микротвердость имеет детонационное покрытие системы Cr-Si с содержанием кремния 25%. Приняв данное содержание Si в системе постоянным, определяем оптимальное содержание бора. Для этого наносили на стальную основу композиционные порошки Cr-Si легированные В, зависимость интенсивности изнашивания и микротвердости от содержания бора проиллюстрирована на рис. 2.

Изменение физико-механических свойств, при изменении фазового состава покрытия показано в таблице 1. Данные микрорентгеноспектрального анализа, полученные в результате оптимизации покрытий Cr-Si-B, позволили классифицировать структуры как тонкий конгломерат (более 75% объема) который составляют ультрадисперсные включения размерами 1–3 мкм, обогащенные бором, типа  $MeB_2$ ,  $MeB_4$ ,  $MeB_6$  и  $MeB_{41}$ , структуру которых определяют атомы бора, образующие жесткие подрешетки с выраженными связями В-В, также определено наличие твердого раствора на основе ромбоэдрической решетки  $\beta$ -В. Кроме того установлено присутствие твердой боридной фазы типа  $(Cr,Si)_4B_5$  имеющей равномерные зерна и интерметаллидных соединений силицидов типа  $MeSi$ ,  $MeSi_2$ ,  $MeSi_3$ , а также боридов кремния  $SiB_4$ ,  $SiB_6$  и вязкой двухфазной хромо-борокремниевой матрицы.

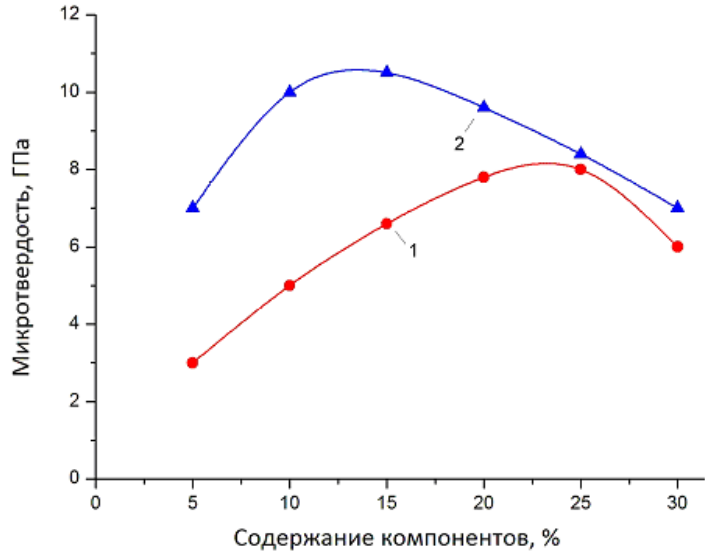


Рис. 1. Характер изменения микротвердости от содержания Si (1) и изменения микротвердости покрытия Cr-Si от содержания В (2)

Изменение физико-механических свойств покрытий при изменении фазового состава

Таблица 1

Покрытие	Толщина, мм	Предел прочности до разрушению ГПа	Прочность сцепления с основой, МПа	Микротвердость, ГПа
Cr-Si	0,20–0,25	0,65–0,78	50–83	6,0–6,9
Cr-Si-B	0,20–0,25	0,79–0,87	74–92	10,5–12,3

Большое значение, в обеспечении качества многокомпонентных покрытий работающих в экстремальных условиях, оказывают технологически параметры детонационного напыления. Была проведена серия экспериментов по определению влияния соотношения рабочих газов и степени заполнения ствола газовой смесью на эксплуатационные характеристики покрытий. На рис. 2 приведена зависимость интенсивности изнашивания от заполнения ствола газовой смесью на основе ацетилена и кислорода при соотношении 1:1. Как видно напыление при расходах рабочих газов в соотношении для ацетилена и кислорода 20/25–22/27 обеспечивают неизменность химического состава и параметров процесса напыления и обуславливают постоянство свойств покрытий, относительная плотность которых ~99%.

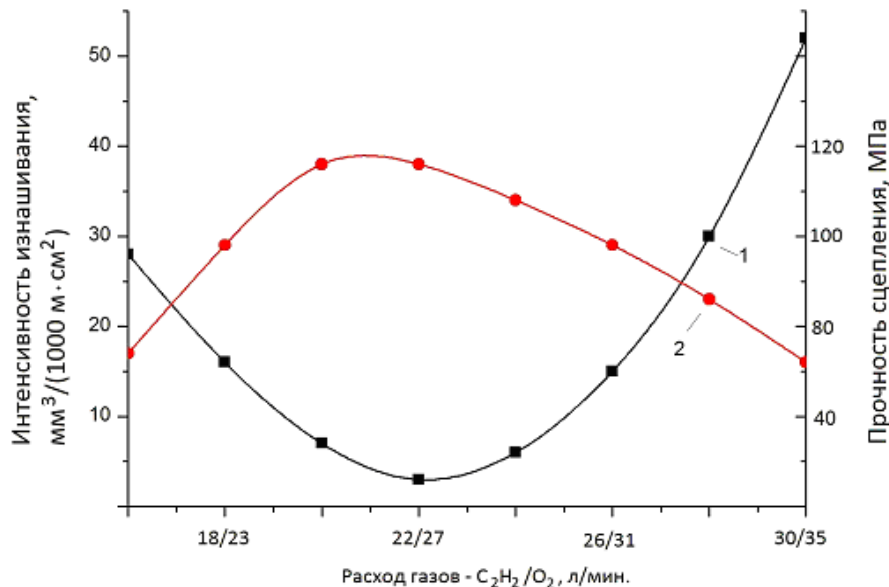


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания (1) и прочности сцепления (2) покрытий Cr-Si-B от расхода газовой смеси

При исследовании износостойкости композиционных детонационных покрытий для сравнения в таких же условиях и по аналогичным программам исследовались образцы с детонационными покрытиями из порошка вольфрамового сплава ВК-15 и на основе нихрома, дополнительно легированного алюминием и бором.

Результаты исследований, определяющие функциональную зависимость интенсивности изнашивания от скорости, представлены на рис. 3. Испытания проводились при нагрузке  $P=5,0$  МПа. Наименьшие значения интенсивности изнашивания характерны для детонационных покрытий на основе Cr-Si-B (кривая 2) и твердого сплава ВК-15 (кривая 1), для которых во всем диапазоне скоростей скольжения наблюдается режим нормального механохимического износа, характеризующегося малыми величинами износа и низким коэффициентом трения.

При этом увеличение скорости не влияет существенно на интенсивность изнашивания покрытия на основе Cr-Si-B. Результаты металлографического анализа показали, что поверхности трения не испытывают значительных повреждений, на них видны лишь следы направленной пластической деформации без явных признаков схватывания.

Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузок исследуемых покрытий проиллюстрирована на рис. 4. Испытания проводились при  $V=0,5$  м/с. Анализируя экспериментальные данные (кривая 2) можно отметить незначительное увеличение износа с ростом нагрузки. Результаты металлографического анализа показывают, что повышение давления обуславливает увеличение фактической площади контакта, как результат – проявление молекулярного взаимодействия поверхностей.

Интенсивность изнашивания покрытия из легированного нихрома при увеличении нагрузки до 8 МПа практически остается постоянным, имеет место устойчивое проявление механохимического изнашивания. Последующее увеличение нагрузки обуславливает незначительное повышение интенсивности изнашивания, что объясняется качественным изменением вида износа и появлением очагов схватывания.

Увеличение нагрузки не влияет существенно на интенсивность изнашивания детонационных покрытий на основе композиционного материала Cr-Si-B. Высокая работоспособность покрытия обуславливается протеканием в широком диапазоне нагрузок универсального явления структурной приспособляемости, за счет интенсивного образования динамически устойчивых ультрадисперсных оксидных структур [4], которые по стехиометрическому составу являются твердыми растворами металлов, входящих в состав покрытия и кислорода окружающей среды, а также представляют собой оксиды типа  $Cr_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $B_2O_3$  и  $CrSi_2O_4$ .

Металлографический анализ (рис. 5.) свидетельствуют о том, что поверхность трения покрытия Cr-Si-B имеет достаточную чистоту и выделяется отсутствием заметных повреждений. Отдельные очаги схватывания, что возникают в данных условиях трения, локализуются в тонких поверхностных слоях.

Результаты исследований, определяющие зависимость интенсивности изнашивания от температуры представлены на рис.6. Исследования проводились при постоянной нагрузке  $P=0,5$  МПа и скорости скольжения  $V=0,5$  м/с.

Наименьшими значениями интенсивности износа, как видно, обладают при данных условиях исследований детонационные покрытия на основе Cr-Si-B, имеет место устойчивый процесс механохимического изнашивания. Увеличение температуры практически не ухудшает характеристики трения и износа, так как на поверхности происходит интенсивное образование структур, имеющих высокие антифрикционные свойства. Принудительное нагревание интенсифицирует процессы взаимодействия поверхности трения с кислородом воздуха, в результате чего образуются пленки вторичных структур.

Микроструктура поверхностных пленок, экранирующих адгезионное взаимодействие в зоне трибоконтакта, имеет мелкодисперсное строение и состоит из смеси фаз композиционного покрытия и продуктов их взаимодействия с кислородом воздуха. По стехиометрическому составу представляет сложный трудноактивируемый комплекс в виде мелкодисперсной смеси оксидов  $Cr_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $B_2O_3$  и сложных фаз типа силицидо-оксидов  $CrSi_2O_4$  и хроматов  $SiCrO_2$  которые в условиях контактных давлений и температур, обуславливающих механохимическое легирование образуют тонкопленочные гетерогенные термоустойчивые

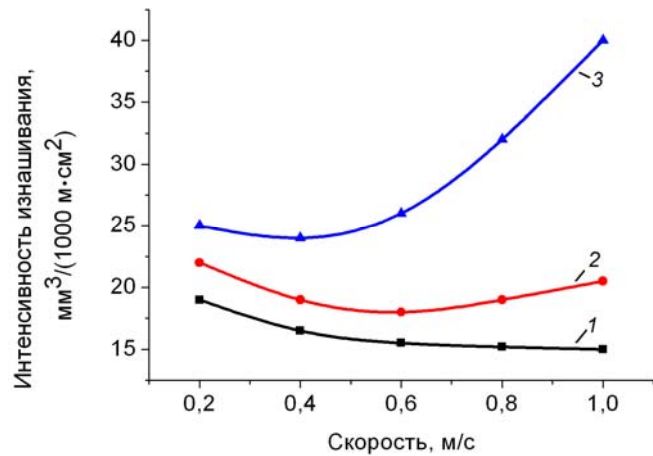


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания покрытий от скорости при  $P=5,0$  МПа: 1 – ВК-15; 2 – Cr-Si-B; 3 – Ni-Cr-Al-B

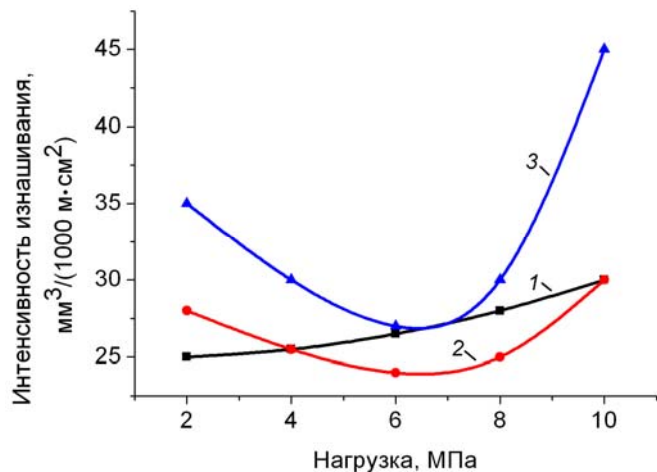


Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания покрытий от нагрузки при  $V=0,5$  м/с: 1 – ВК-15; 2 – Cr-Si-B; 3 – Ni-Cr-Al-B

поверхностные структуры. Кроме того, велика вероятность существования твердых растворов типа  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ . Наличие термически устойчивого борного ангидрида ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), который образуется при взаимодействии высших боридов хрома и кислорода окружающей среды, являющегося химически активной формой борной кислоты, превращает оксид хрома в метаборат типа  $\text{Cr}(\text{BO}_2)_2$ , что способствует образованию вязкой плотной „глазури”, и также препятствует адгезионно-молекулярному взаимодействию, выполняя роль твердой смазки, и способствует аккомодации зернограничного скольжения. Таким образом, формирование поверхностных пленок вторичных структур обусловлено фазовым и химическим составом поверхностного слоя, характерной особенностью состояния которого является изменение микротвердости до 19-21 ГПа при исходной  $16 \pm 0,5$  ГПа, связанные с влиянием механических и тепловых импульсов, а также диффузионных процессов легирующих элементов и атмосферного кислорода, обуславливающих фазовые превращения, перераспределения структурных составляющих и образование при трении высокодисперсной гетерогенной квазиравновесной износостойкой структуры.

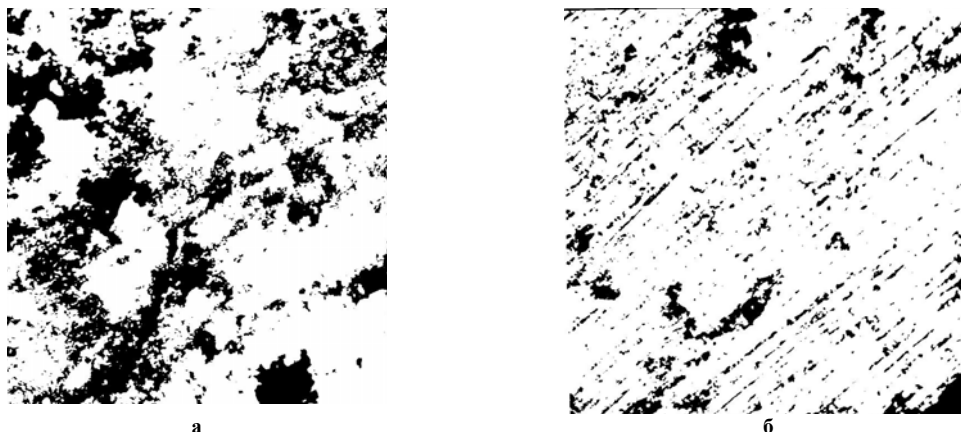


Рис. 5. Микрофотографии поверхностей трения покрытий Cr-Si-B при скоростях скольжения: а –  $V=0,2$  м/с; б –  $V=0,5$  м/с (x340)

Повышение температуры испытаний практически не влияет на интенсивность изнашивания покрытия на основе Cr-Si-B, имеет место стойкий процесс механохимического изнашивания. В процессе испытаний нихрома установлено, что нагрев образцов больше чем  $400^\circ\text{C}$  увеличивает интенсивность изнашивания в результате тепловых перегрузок, что обуславливают образование в тонких поверхностных слоях точек схватывания.

Для детонационных покрытий из вольфрамового твердого сплава ВК-15 при температуре  $550^\circ\text{C}$  и происходит интенсивное окисление карбида вольфрама и размягчение связки, что обуславливает снижение триботехнических свойств покрытий.

**Выводы.** Износостойкость детонационных покрытий Cr-Si-B работающих в экстремальных условиях трения, обусловлена устойчивым проявлением структурной приспособляемости за счет формирования в процессе трения ультрадисперсных, имеющих ориентированное строение, вторичных структур, выполняющих роль твердых смазок в данных условиях трения.

С энергетической точки зрения данную трансформацию вторичных структур можно рассматривать в качестве адекватных элементарных механизмов адаптации поверхностных слоев в процессе структурной приспособляемости системы трения. Так, с одной стороны, в следствии статистических закономерностей фазообразования фрагментация вторичных структур на различных участках контактных поверхностей не совпадают, но их аддитивное распределение представляет устойчивое структурно-временное состояние, с другой – формирование структуры поверхностного слоя не является индетерминированным, а управляется минимальными принципами диссипативных процессов.

Таким образом, покрытия Cr-Si-B имеют высокую работоспособность при трении в условиях отсутствия смазки в широком нагрузочно-скоростном и температурном диапазоне внешних воздействий, и могут быть рекомендованы для защиты трибосопряжений работающих в экстремальных условиях трения.

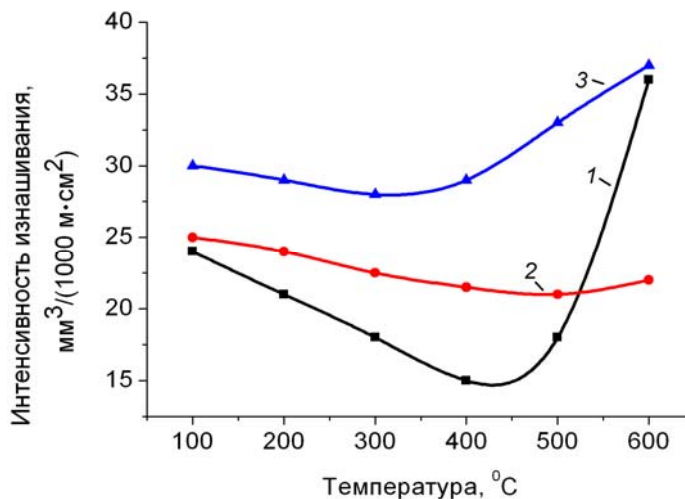


Рис. 6. Зависимость интенсивности изнашивания покрытий от температуры при  $P=0,5$  МПа,  $V=0,5$  м/с: 1 – ВК-15; 2 – Cr-Si-B; 3 – Ni-Cr-Al-B

## Литература

1. Аренсбургер Д. С. Покрытия напыляемые высокоскоростным газотермическим методом / Д. С.

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 znosostijkiy 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 якісною і кількісною новими експлуатаційними