



УДК 538.9

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$

И.М. Трегубов¹⁾, М.Ю. Смолякова²⁾, М.А. Каширин¹⁾,
М.К. Добрынин¹⁾, О.В. Стогней¹⁾

¹⁾ Воронежский государственный технический университет,
Московский пр. 14, Воронеж, 394016, Россия, e-mail: ilia.tregybov@mail.ru

²⁾ Белгородский государственный университет,
НОиИЦ «Наноструктурные материалы и нанотехнологии»,
ул. Победы 85, Белгород, 308015, Россия.

Аннотация. Проведено исследование износостойкости и микротвёрдости тонкоплёночных наноконпозиционных покрытий $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ в широком интервале концентраций металлической фазы ($30 \leq x \text{ ат.} \leq 65\%$). Установлено, что максимальная твёрдость (до 11 ГПа) наблюдается в композитах с концентрацией металлической фазы более 50 ат. %. Показано, что нанесение на ситалловую подложку СТ-50 наногранулированного композита приводит к увеличению износостойкости более чем на два порядка относительно чистого ситалла. Фактор износа для композита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ составляет $0,4 \cdot 10^{-6} \div 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3 \text{Н}^{-1} \text{м}^{-1}$.

Ключевые слова: наногранулированные композиционные пленки, износостойкость.

1. Введение. Эффективным средством повышения износостойкости металлических изделий является создание на их поверхности упрочняющих покрытий, получаемых различными методами [1-2]. В настоящее время одним из методов упрочнения поверхности металлических материалов является создание наноконпозитов металл-керамика, так как перспективным представляется сочетание в одном материале преимуществ, которыми обладает керамика и металлические сплавы по отдельности. В данной работе исследованы механические характеристики наноструктурных покрытий, сформированных из композиционных материалов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$, и установлены зависимости величины фактора износа и величины микротвёрдости композитов от концентрации металлической фазы.

2. Методика. Композиты получались методом ионно-лучевого распыления составных мишеней. Осаждение компонентов материала производилось на ситалловые подложки СТ-50. Толщина покрытий составляла $\sim 5 \div 6$ мкм. Наногранулированность структуры композитов подтверждалась электронно-микроскопическими исследованиями образцов ($600 \div 800 \text{ Å}$), напыленных на монокристаллы NaCl. Химический состав образцов контролировался рентгеновским электронно-зондовым микроанализом. Исследование износостойкости композиционных покрытий проводилось с помощью автоматизированной машины трения по схеме испытания "шарик-диск" [3]. В качестве материала контртела был выбран корундовый шарик диаметром 6 мм. Трибологические характеристики исследуемых образцов оценивали в зависимости от прикладываемой нагрузки 2 и 4 Н, при скорости вращения 7 см/сек и пути трения 200 м. Измерение микротвёрдости наноконпозитов осуществлялось по методу Виккерса с помощью прибора ПМТ-3М при нагрузке на индентор 0,29 и 0,49 Н.

3. Результаты. Микроструктура композита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{55}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{45}$ показана на рис. 1. Она представляет собой систему, которая состоит из металлических гранул, распределённых в

керамической матрице. При меньшей концентрации металлической фазы гранулы становятся более изолированными друг от друга, и их размеры снижаются, при увеличении концентрации образуется больше металлических кластеров [4]. Электронная дифракция, полученная от образцов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$, свидетельствует о том, что как керамическая матрица, так и металлическая фаза композитов являются аморфными.

Механические свойства нанокompозитных покрытий зависят от объёмного соотношения фаз, химического взаимодействия между фазами и их микроструктуры, поэтому одним из наиболее важных вопросов, является вопрос о влиянии морфологии композитов на их механические свойства. Морфология, в свою очередь, определяется объёмным соотношением фаз и химическим взаимодействием между ними, поэтому в данной работе использовались покрытия, содержащие различное количество металлической фазы ($30 \leq x \text{ ат.} \leq 65\%$).

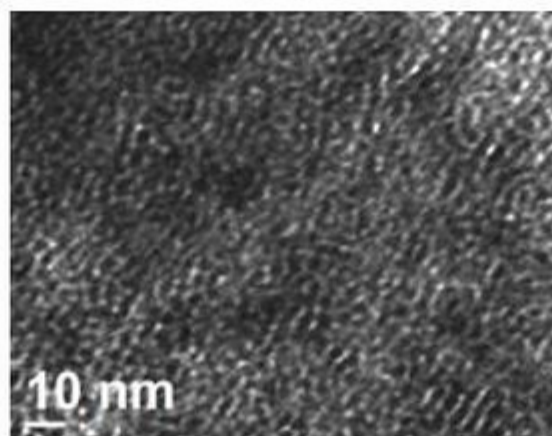


Рис. 1. Электронная микрофотография композита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{55}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{45}$.

Исследование износостойкости ситалловой подложки и композиционных покрытий $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$, показало, что износостойкость композитов на два порядка выше износостойкости ситалла (рис. 2). Для ситалла фактор износа составил: $2,0 \cdot 10^{-4}$ и $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3 \text{Н}^{-1} \text{м}^{-1}$, при прикладываемой нагрузке на контртело 2 и 4 Н соответственно. Стоит отметить, что значения фактора износа для ситалла практически не изменяются при увеличении нагрузки в 2 раза. Нанесение на ситалловую подложку наногранулированного композита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ приводит к снижению фактора износа, измеряемого при 2 Н до $0,4 \cdot 10^{-6} \div 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3 \text{Н}^{-1} \text{м}^{-1}$, в зависимости от содержания металлической фазы. Причём, увеличение концентрации металлической фазы приводит к ухудшению износостойкости композитов. Снижение износостойкости наблюдается в тех композитах, чей состав находится за порогом перколяции. Увеличение нагрузки до 4 Н приводит к разрушению композиционного покрытия. По всей видимости, разрушение плёнки происходит вследствие низкой адгезии покрытия к подложке. Об этом свидетельствует внешний вид подложки в области следа от контртела при нагрузке. Поверхность подложки слабо деформирована, в то время как покрытие с неё удалено практически полностью (рис. 3).

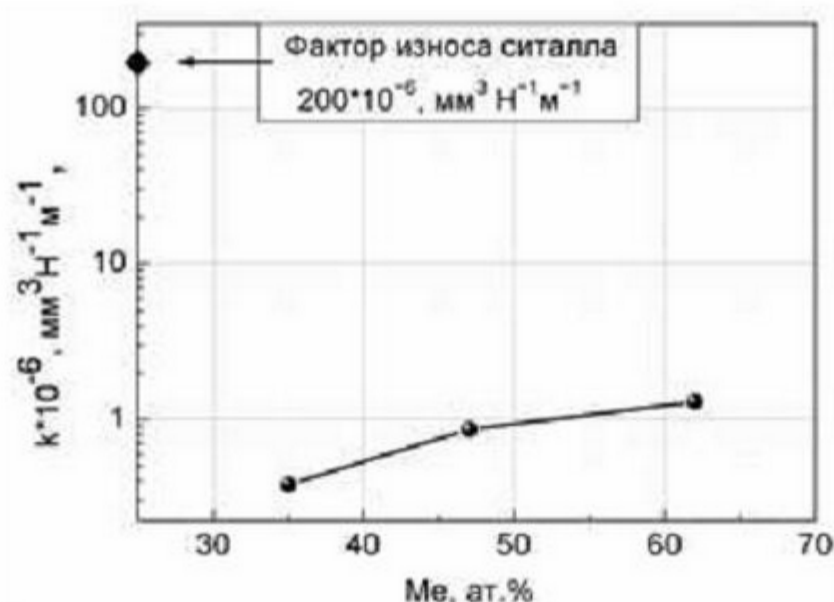


Рис. 2. Концентрационная зависимость фактора износа, измеренного при нагрузке 2 Н нанокompозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$.

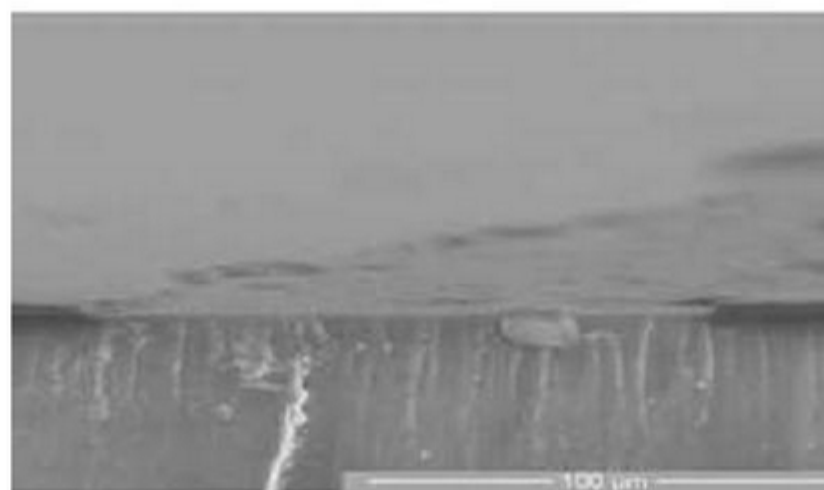


Рис. 3. Вид ситалловой подложки с нанесенным покрытием нанокompозита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{38}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{62}$ после испытаний при нагрузке на держатель контртела 4 Н.

На рис. 4 показана концентрационная зависимость микротвёрдости нанокompозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$. Очевидно, что микротвёрдость монотонно возрастает с увеличением концентрации металлической фазы, достигая максимальных значений при ~60 ат.%, после чего начинает резко снижаться. Возможно, это связано с тем, что в интервале составов 30-55 ат.% $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ морфология композитов представляет собой совокупность наноразмерных металлических гранул или небольших цепочек из них, окруженных керамической прослойкой (рис. 1). При этом, обычный механизм пластического деформирования в такой структуре объёмного аморфного металлического сплава блокируется вследствие малости металлических областей. Межзёрное скольжение также блокируется, поскольку в композитах рассматриваемого концентрационного диапазона металлические гранулы изолированы друг относительно

друга керамическими прослойками. Блокирование смещения зёрен друг относительно друга способствует высокой прочности и износостойкости нанокompозитов металл-керамика. С другой стороны, наличие металлических областей в объёме керамической фазы-"сетки" препятствует линейному развитию микротрещин при деформировании композиционного покрытия, обеспечивая его высокую прочность. Снижение микротвёрдости в композитах, содержащих металлическую фазу в количестве, превышающем 60 ат.%, $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$, обусловлено разрывом армирующей керамической сетки и формированием больших металлических кластеров, в которых возможна пластическая деформация.

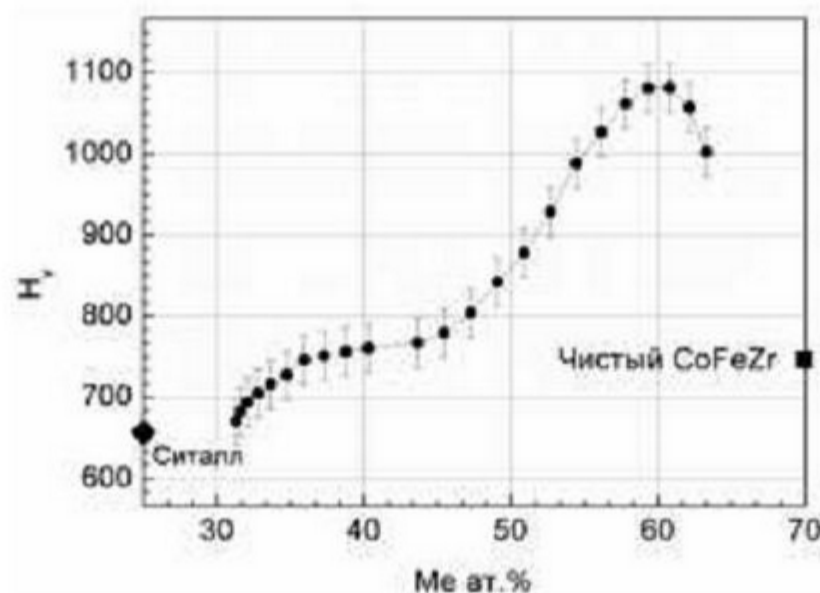


Рис. 4. Концентрационная зависимость микротвёрдости нанокompозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$.

4. Выводы. Показано, что нанесение на ситалловую подложку наногранулированного композита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ приводит к увеличению износостойкости, измеряемой при нагрузке 2 Н, более чем на три порядка. Фактор износа уменьшился с $2,0 \cdot 10^{-4} \div 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3\text{Н}^{-1}\text{м}^{-1}$ (ситалл) до $0,3791 \cdot 10^{-6} - 1,289 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3\text{Н}^{-1}\text{м}^{-1}$ (композит). Возрастание концентрации металлической фазы в композите приводит к снижению его износостойкости. Установлено, что концентрационная зависимость микротвёрдости нанокompозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ немонотонна и проходит через максимум. В интервале составов 30-60 ат.%, $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{Zr}_{20}$ наблюдается возрастание микротвёрдости, достигающей максимального значения $\sim 11 \text{ ГПа}$ при концентрации металлической фазы 60 ат. %. Предполагается, что высокие механические свойства композитов обусловлены особенностями их морфологии, которая представляет собой сочетание двух различных наноструктурированных сред: металлической и керамической, с высокой объёмной долей границ раздела фаз, препятствующих как межзёренному скольжению, так зарождению и развитию дислокаций, а также хрупкому растрескиванию.

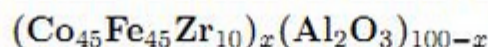
Работа выполнена в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" г/к № 14.740.11.0986 и гранта РФФИ 09-02-97536-р центра.



Литература

1. Xu G. Characteristics of Ni-based coating layer formed by laser and plasma cladding processes / G. Xu, M. Kutsuna, Z. Liu, H. Zhang // Materials Science and Engineering A. – 2006. – 417. – P.63-72.
2. Kim H.-J. Assessment of wear performance of flame sprayed and fused Ni-based coatings / H.-J. Kim, S.-Y. Hwang, C.-H. Lee, P. Juvanon // Surface and Coatings Technology. – 2003. – 172. – P.262-269.
3. Вершинин Д.С. Исследование трибологических свойств азотированного титанового сплава BT16 / Д.С. Вершинин, М.Ю. Смолякова, и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – 76;12. – С.45-48.
4. Ремизов А.Н. Электрические свойства нанокомпозитов аморфных сплавов $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10}$ в матрице из SiO_2 и Al_2O_3 / Диссертация на соискание учёной степени кандидата физ.-мат. наук. Воронеж, 2003. – 148 с.
5. Koval N.N., Sochugov N.S., Devyatkov V.N., Grigoryev V.P., Arslanov I.R., Mikov A.V., Podkovyrov V.G., Kensuke Uemura. Automated power-complex for materials by electron beam // Известия вузов. Физика. – 2006. – 8. – Приложение. – С.51-54.

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED COATING GRANULAR COMPOSITES



I.M. Tregubov¹⁾, M.Yu. Smolyakova²⁾, M.A. Kashirin¹⁾,
M.K. Dobrinin¹⁾, O.V. Stognei¹⁾

¹⁾ Voronezh State Technical University,
Moskovsky av., 14, Voronezh, Russia, 394016, e-mail: ilia.tregubov@mail.ru

²⁾ Belgorod State University,
Centre of nanostructural materials and nanotechnologies,
Pobedy st., 85, Belgorod, 308015, Russia.

Abstract. Thin coatings of nanogranular composites $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ have been investigated in the wide range of concentration ($30 \leq x \text{ at.} \leq 65\%$) from the viewpoint of their mechanical properties. It has been established that maximum hardness (up to 11 GPa) is observed in composites when the concentration of metallic phase is more than 50 at. %. It has been shown that the coating of the nanogranular composite of the glass-ceramic substrate ST-50 leads to the increasing of the wear resistance. It is more than two value orders relative to pure glass-ceramic. It has been found that the dimensional wear coefficient of nanocomposites $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ is $0,4 \cdot 10^{-6} \div 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$.

Key words: nanogranular composite films, wear resistance.