

- [sprayinginterfinish-seria // 2014](#) International Conference on Surface Engineering for Research and Industrial Applications. Novosibirsk, 2014. P.68
7. Krivezhenko D.S., Laptev I.S., Zimoglyadova T.A. Electron-Beam Cladding of Boron Carbide on Low-alloyed Steel at the Air Atmosphere // Applied Mechanics and Materials. 2015. V. 698. P. 369-373.
 8. Hayun S., Kalabukhov S., Ezersky V., Dariel M.P., Frage N. Microstructural characterization of spark plasma sintered boron carbide ceramics // Ceramics International. 2010. V. 36. P. 451–457.
 9. Sahibzada Shakir Rehman, Wei Ji, Shahzad Ahmad Khan, Muhammad Asif, Zhengyi Fu, Weimin Wang, Hao Wang, Jinyong Zhang, Yucheng Wang. Microstructure and mechanical properties of B₄C based ceramics with Fe₃Al as sintering aid by spark plasma sintering // Journal of the European Ceramic Society. 2014. V. 34. P. 2169–2175.
 10. Rafiei M., Salehi M., Shamanian M., Motallebzadeh A. Preparation and oxidation behavior of B₄C–Ni and B₄C–TiB₂–TiC–Ni composite coatings produced by an HVOF process // Ceramics International. 2014. V. 40. P. 13599–13609.
 11. Безрукова В.А., Корниенко Е.Е., Кузьмин В.И. Структурные особенности плазменных покрытий системы B₄C–Ni // Пятая региональная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современной науки». Публикация находится в печати.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ AL₂O₃–MO₂N
ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ БЕЗ СМАЗКИ
В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 25 - 600°C**

Г.В. ГОРДИЕВСКИЙ¹, Н.К. ГАЛЬЧЕНКО, В.П. САМАРЦЕВ

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: gennadygordievsky@yandex.ru

**RESEARCH OF STRUCTURE AND TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS
OF PLASMA COVERINGS OF THE AL₂O₃–MO₂N SYSTEM AT A SLIDING
FRICTION WITHOUT GREASING IN THE RANGE OF TEMPERATURES 25-
600°C**

G.V.GORDIEVSKY¹, N.K. GALCHENKO, V.P. SAMARCEV

¹Tomsk Polytechnic University
Institute of Strength Physics and Materials Science
E-mail: gennadygordievsky@yandex.ru

Annotation This paper studies the friction and wear characteristics of plasma coating of system Al₂O₃–Mo₂N (in the finger-disc friction without lubrication). Tribological characteristics were correlated with microstructure and micromechanical properties of the coatings. The optimum coating compositions that ensure maximum microhardness and wear resistance were determined. The coatings Al₂O₃–Mo₂N showed high wear resistance at sufficiently low microhardness and a small wear rate and a low friction coefficient when contacting with a counterbody made of SiC. The tests have shown that the developed composite powder coatings have high durability and can be used as protective coatings of critical parts.

Введение. В области упрочнения и восстановления деталей актуальной задачей является создание на их поверхности защитных покрытий с широким диапазоном свойств, способных надёжно работать в условиях повышенных температур, высоких нагрузок и скоростей трения. Из покрытий системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Me}_x\text{N}_y$ (Me_xN_y – нитриды металлов VI-VIII групп) особый интерес представляют покрытия на базе дисульфидов и нитридов молибдена, последний из которых является хорошей альтернативой покрытиям из нитрида титана благодаря более высоким триботехническим характеристикам при повышенных температурах, обусловленным образованием в зоне трения оксида молибдена, играющего роль твердой смазки [1-3]. В настоящий момент композиционные покрытия системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}_2\text{N}$ изучены недостаточно, что делает актуальным проведение исследования свойств и структурных особенностей данных материалов.

Цель работы – проведение исследований, устанавливающих взаимосвязь между составом, структурой и трибологическими свойствами покрытий системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}_2\text{N}$ в зависимости от содержания нитридов и температуры испытаний.

Материалы и методика эксперимента. Для формирования покрытий системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}_2\text{N}$ использовали смесь порошков исходных компонентов дисперсностью менее 40 мкм, которую гранулировали гидростатическим прессованием с последующим дроблением и выделением фракции 65-100 мкм. Покрытия наносили с использованием плазменной установки УПУ – 8М и плазмотрона ПП-25. Режимы напыления: $U=40\text{В}$, $I=400\text{А}$; плазмообразующий газ – транспортирующий газ – аргон; расход плазмообразующего газа – $2\text{м}^3/\text{ч}$; расход порошка – 60 г/мин ; дистанция напыления – 100-120 мм. Покрытия наносили на подложки из меди с промежуточным подслоем из сплава Н85Ю15; плазмообразующий газ – $\text{Ar}+\text{N}_2$. Трибологические свойства покрытий исследовали на машине трения PC-Controlled High Temperature Tribometer THT-S-AX0000 по схеме «неподвижный индентор из карбида кремния SiC диаметром 1,5мм - вращающийся диск»: скорость вращения – $v=8\text{ см/сек}$, нагрузка – $P=600\text{г}$, температура испытания – 25 и 600°C .

Результаты эксперимента и их обсуждение. В результате проведенной оптимизации составов покрытий по их качеству (отсутствию видимых дефектов и отслаивания от медных подложек) выбраны покрытия двух составов: 1) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\text{мас.}\%\text{Mo}_2\text{N}$; 2) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}70\text{мас.}\%\text{Mo}_2\text{N}$, фазовый состав которых представлен на рисунке 1.

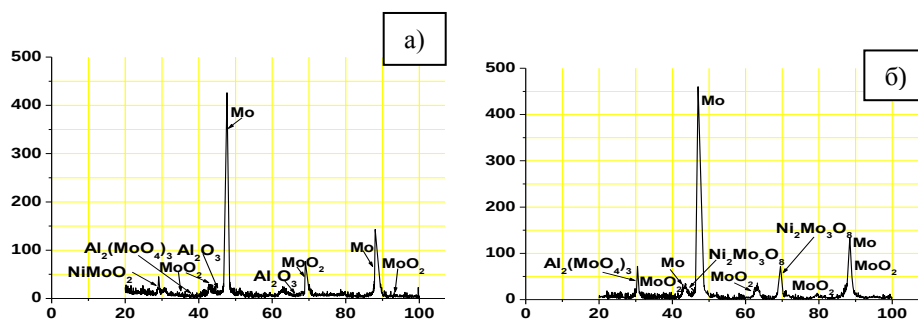


Рисунок 1 – Рентгенограммы, полученные с поверхности покрытий а) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\text{ мас.}\%\text{Mo}_2\text{N}$; б) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}70\text{ мас.}\%\text{Mo}_2\text{N}$

Согласно данным рентгенофазового анализа (рис.1), основу исследуемых составов покрытий составляют молибденовая связка и сложные оксиды основных ле-

гирующих элементов, происхождение которых, вероятно, стало результатом частичной диссоциации оксидов алюминия и взаимодействия через расплав элементов покрытия и материала подслоя Н85Ю15. Если на дифрактограмме покрытия с 30мас.% Mo_2N можно наблюдать рефлексы от фазы Al_2O_3 (рисунок 1,а), то в покрытии с 70 мас.% Mo_2N алюминий присутствует лишь в составе шпинелей $\text{Al}_2(\text{MoO}_4)_3$ (рисунок 1, б).

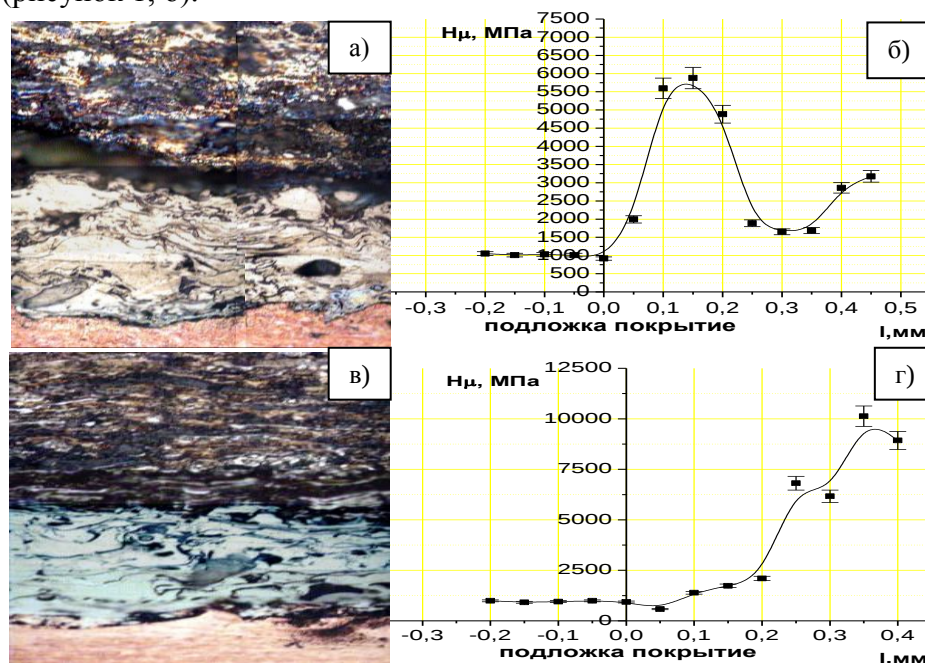


Рисунок 2- Микроструктуры и графики распределения микротвёрдости по глубине покрытий: а,б- Al_2O_3 -30% масс.% Mo_2N ; в,г- Al_2O_3 -70% масс.% Mo_2N (в,г). X1000

Результаты исследований показали, что соотношение компонентов в напыляемой смеси влияет на структуру и свойства металлокерамических покрытий. С повышением концентрации Mo_2N в исходной смеси однородность структур и плотность (напылённых покрытий повышаются за счёт увеличения доли металлической составляющей. Максимальную плотность имеют покрытия состава Al_2O_3 -70% Mo_2N ($\gamma=8,8 \text{ г/см}^3$) (таблица 1).

Таблица 1 - Гидростатическая плотность покрытий системы $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Mo}_2\text{N}$

Расчетное содержание Mo_2N в покрытии	5%	15%	30%	70%
плотность, γ , г/см^3	5,3	7,04	8,69	8,8

Характер неоднородности структур по глубине слоя исследуемых покрытий отражают значения микротвёрдости, представленные на рис.1б,г.. Показано, что максимальные значения микротвёрдости в покрытии с 30% Mo_2N находятся в центре слоя и составляют $H_\mu \approx 5500 \text{ МПа}$. На поверхности твёрдость резко падает до $H_\mu = 3000 \text{ МПа}$, что, видимо, обусловлено слоистостью структуры покрытия, повышенной пористостью и наличием в поверхностных слоях покрытия преимущественно чистого Mo с единичными включениями Al_2O_3 . В покрытиях состава Al_2O_3 -70% Mo_2N наблюдается плавное увеличение микротвердости до $H_\mu \approx 8800 \text{ МПа}$.

Результаты сравнительных характеристик трения и изнашивания покрытий- Al_2O_3 -30% мас.% Mo_2N и Al_2O_3 -70% мас.% Mo_2N по схеме «неподвижный индентор из карбида кремния SiC - вращающийся диск» при температурах 25 и 600°C представлены на рисунке 3.

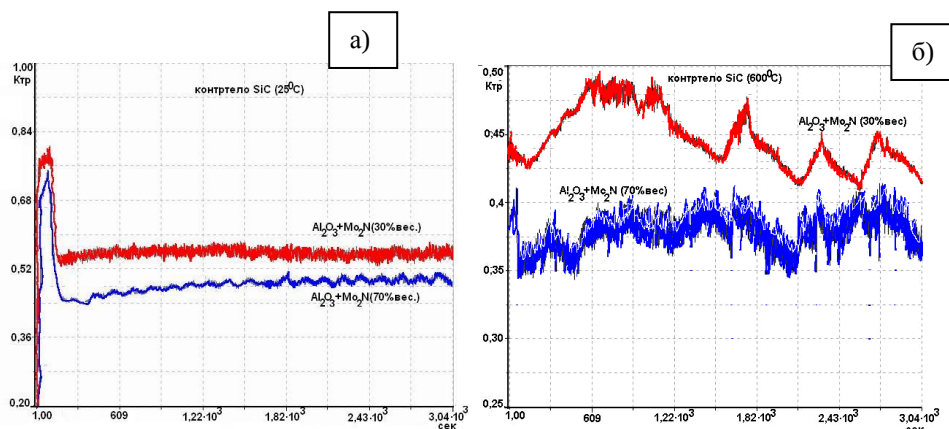


Рисунок 3 - Сравнение коэффициентов трения покрытий- Al_2O_3 -30% мас.% Mo_2N и Al_2O_3 -70% мас.% Mo_2N а) при комнатной температуре; б) и при 600 °C

Эксперимент показал, что покрытие состава Al_2O_3 -70%вес. Mo_2N наряду с более высокими значениями плотности и микротвердости обладают также более низкими значениями коэффициентов трения как при комнатной, так и при повышенной температурах, что, вероятно, обусловлено наличием в поверхностях трения шпинелей NiAl_2O_4 , $\text{Ni}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$, играющих роль твёрдой смазки.

На рисунке 4 представлены фотографии поверхностей износа покрытий, иллюстрирующие характер разрушения покрытий при трении. При износе в паре

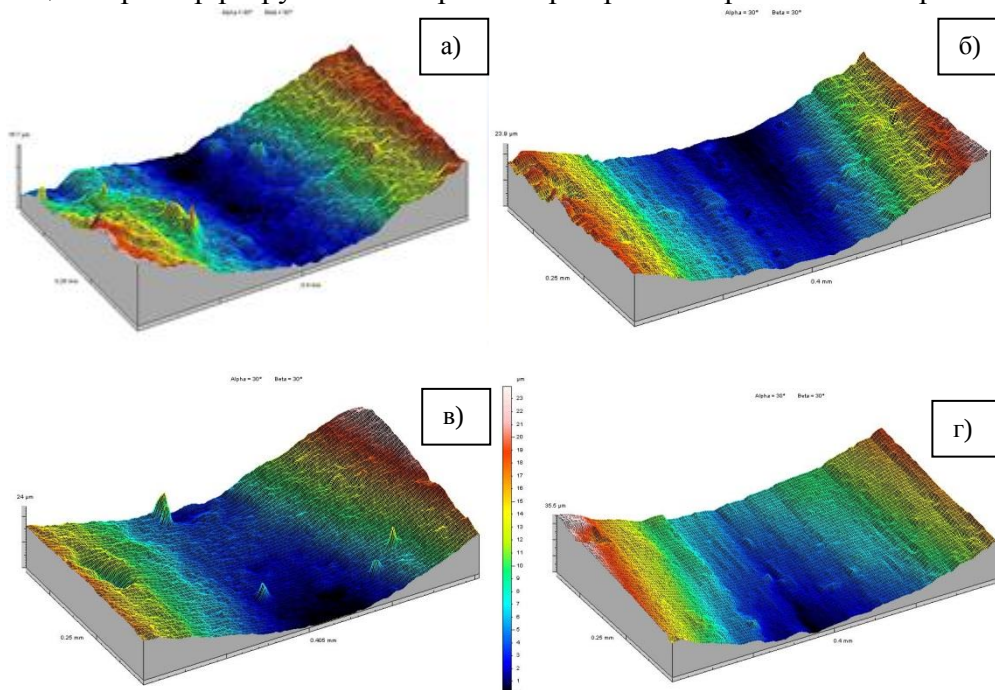


Рисунок 4 - Вид поверхности износа контртелом из SiC при температурах (а,в) 25°C; (б,г) 600°C; а,б.) Al_2O_3 - Mo_2N (30% мас.); в,г.) Al_2O_3 - Mo_2N (70% мас.)

трения с контртелом SiC (рисунок 4) покрытие Al_2O_3 -70%вес. Mo_2N имеет более гладкую поверхность по сравнению с покрытием с 30%мас.. Mo_2N , у которого происходит частичное вырывание отдельных частей покрытия и отмечены явно выраженные признаки схватывания в результате фрикционного взаимодействия.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, в процессе плазменного напыления формируются композиционные покрытия системы Al_2O_3 – Mo_2N на основе молибденовой связи и сложных оксидов основных легирующих элементов. Эксперимент показал, что исследуемые в работе составы покрытий с повышением температуры испытаний показывают снижение значений коэффициента трения и удельного износа. Гораздо лучшие трибологические показатели имеют покрытия Al_2O_3 -70% масс Mo_2N , у которых при повышении температуры испытания до 600°C при условиях благоприятной приработки обеспечивается снижение коэффициента трения с 0,5 fтр (при 25°C) до 0,38 fтр, что, очевидно, обусловлено образованием фаз оксида молибдена, выполняющих роль высокотемпературных твердых смазок в условиях нагрева.

Список литературы

1. Гальченко Н.К., Самарцев В.П. Белюк С.И., Гальченко В.Г. Особенности формирования структуры и свойства металлокерамических покрытий, полученных нитридо-плазменной технологией // Проблемы черной металлургии и материаловедения, -№1.-2010.-С. 60-64.
2. Buck V. Morphological properties of sputtered Mo_2S films // Wear . – 1983-V.191. –Р. 81-88
3. S.M. Aouadi, Y.Paudel, W.J. Simonson, Q. Ge, P. Kohli, C. Muratore, A.A. Voevodin, Tribological investigation of adaptive $\text{Mo}_2\text{N}/\text{Mo}_2\text{S}/\text{Ag}$ coatings with high sulfur content// Surface and Coatings Technology. -2009 –Vol. 203.-P. 1304-1309.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ОТНОСИТЕЛЬНУЮ АДГЕЗИЮ

Ю.А. УЛЫБИНА, Б.С. ЗЕНИН

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: yau@tpu.ru

ASSESSMENT OF PROCESS THERMAL SPRAYING ON FACTORS DETERMINED BY THE RELATIVE ADHESION

Y.A. ULYBINA, B.S. ZENIN

Tomsk Polytechnic University

E-mail: yau@tpu.ru

Abstract. In this paper we studied the features of the energy balance in the system particles - substrate during thermal spraying covering. The activation energy of the atoms in the hot surface layer of the substrate was estimated. The effect of particle velocity on the activation energy of the atoms of the substrate was investigated. It is shown that in the framework of selected models of activation energy of the atoms of the substrate depends on the deposition process parameters.