

УДК 621.793

РАЗЛИЧИЯ ФИЗИКО-ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАГНЕТРОННО-ПЛАЗМЕННОГО АНТИФРИКЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ Ti–C–Mo–S, НАНЕСЕННОГО НА ПОДЛОЖКИ ИЗ СТАЛЕЙ 40X И 20X13

Шубин А.Ю.^{1,2}, аспирант кафедры точного приборостроения (ayshubin@gmail.com)
Потеев А.И.², д.ф.-м.н., профессор, директор Сибирского физико-технического института
им. В.Д. Кузнецова (СФТИ ТГУ), заведующий лабораторией
перспективных материалов и технологий (kanc@spti.tsu.ru)
Савостиков В.М.², к.т.н., ведущий технолог (svm.53@mail.ru)
Табаченко А.Н.², к.ф.-м.н., заведующий лабораторией (tabachenko@spti.tsu.ru)
Галсанов С.В.², к.т.н., инженер-исследователь (s_galsanov@mail.ru)

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет
(634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30)

² Национальный исследовательский Томский государственный университет
(634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36)

Аннотация. Представлены результаты сравнительных исследований трибологических и физических свойств антифрикционного покрытия многокомпонентного состава Ti–C–Mo–S, нанесенного комбинированным магнетронно-плазменным методом на подложки из сталей 40X и 20X13. Покрытие на подложках из сталей 40X и 20X13 формировали в одной загрузке, т.е. в одинаковых условиях и при одинаковых технологических режимах путем магнетронного распыления катодов, изготовленных при помощи СВС-синтеза, и ассистирующего воздействия высокоплотной газоразрядной плазмы, формируемой плазменным источником ПИНК. В работе приведены технологические приемы, применявшиеся при нанесении покрытия. После формирования покрытия подложки подвергали фрикционным испытаниям на трибометре по схеме «pin-on-disk», линейная скорость перемещения контртел относительно друг друга составляла 50 – 60 см/с. Полученные результаты показали существенное различие трибологических характеристик покрытия в зависимости от материала подложки, в первую очередь, износостойкости. Выявлена существенная разница показателей ресурса работы покрытия на подложках из разных материалов при сравнении малолегированной хромом (примерно 1 %) стали 40X (износостойкость более высокая) и высоколегированной хромом (примерно 13 %) сталью 20X13. Представлены результаты оптической и электронно-растровой микроскопии треков износа, обнаружено различие в характере и степени износа покрытия на подложках из сталей 40X и 20X13. При помощи электронного профилометра по усредненной площади поперечного сечения дорожки трения оценен удельный износ покрытия на 1000 оборотов диска: площадь сечения дорожки износа покрытия на подложке из стали 20X13 в четыре раза больше, чем на подложке из стали 40X. Комплексный анализ результатов физико-трибологических исследований позволяет предположить, что выявленное различие обусловлено, в первую очередь, разным исходным химико-фазовым составом и различиями в структуре использованных в эксперименте материалов подложки, определяющих свойства легированного поверхностного слоя и прочность сцепления (адгезию) покрытия с подложкой и, в конечном счете, механизм изнашивания.

Ключевые слова: магнетронно-плазменный метод, антифрикционное покрытие, многокомпонентный состав, трибология, трение, износ, коэффициент трения, износостойкость.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-12-966-971

В настоящее время преобладающей научно-технологической тенденцией является разработка и исследование функциональных покрытий многокомпонентного состава, вариации которого позволяют целенаправленно управлять структурно-фазовым состоянием, физическими, химическими и трибологическими свойствами. Одним из направлений в этой области является создание покрытий со сверхвысокой твердостью («superhard coatings») [1 – 4]. Однако многочисленными исследованиями установлено, что износостойкость обеспечивается не только высокой твердостью материала покрытия, но и достаточно низким коэффициентом трения. Примерами реализации такого сочетания могут служить многокомпонентные

составы покрытий Ti–Si–C–N [5], Ti–B–C–N [6], MoS₂–Cr [7], MoS₂–Nb [8], Mo:S:C:Ti:B [9, 10]. При этом выявлено, что физико-трибологические свойства таких покрытий зависят, в первую очередь, от относительного содержания компонентов в их составе, а также от режимов осаждения. Очень убедительно это показано в работах [11, 12], где установлено, что структурно-фазовое состояние магнетронных трибологических покрытий на основе углерода с титаном или молибденом зависит от содержания металла в их составе и плотности ионного тока на подложку. В настоящее время также общепризнано и экспериментально подтверждено, что для долговременной работы трибологического покрытия необходимо обеспечить прочность сцепления его

с подложкой (основой изделия) и достаточно плавное (градиентное) изменение состава, структуры и физико-механических свойств от основы к внешней рабочей поверхности. Для градиентного построения, например, в работе [13] осуществляли предварительное упрочнение стальной основы ионным азотированием перед магнетронным осаждением твердого покрытия из нитрида титана (TiN) и финишное магнетронное осаждение внешнего антифрикционного слоя из дисульфида молибдена (MoS_2). В работе [14] градиентное построение реализуется путем формирования промежуточного слоя смешанного состава TiN + MoS_2 между твердым подслоем TiN и внешним антифрикционным слоем MoS_2 . В работе [15] на твердый подслой типа TiN, TiCN магнетронным напылением наносили внешний слой смешанного состава MoST^{TM} , представляющий собой композицию дисульфида молибдена с титаном.

В Сибирском физико-техническом институте Томского государственного университета разработано трибологическое покрытие многокомпонентного состава Ti–C–Mo–S. Комбинированный способ магнетронно-плазменного формирования градиентно-композиционной структуры этого покрытия на титановых сплавах с предварительным легированием и модифицированием свойств поверхностного слоя подложки запатентован как изобретение [16]. С целью расширения области применения указанного комбинированного способа представляется необходимым оценить возможность и эффективность его использования на других материалах, в частности, на сталях с различными составом и свойствами.

Исследования проводили на широко применяемых в отечественной промышленности конструкционной стали 40X и коррозионно-стойкой стали 20X13. По своему химическому составу эти стали отличаются, в первую очередь, содержанием хрома – около 1 % в стали 40X и около 13 % в стали 20X13. Стали предварительно подвергали закалке с отпуском на твердость HRC 42 – 45. Образцы для исследования изготавливали в виде дисков diam. 50 мм и толщиной 4 мм. Диски шлифовали и полировали с применением алмазных паст и водной взвеси оксида хрома. Шероховатость поверхности полированных образцов (R_a) не превышала 0,1 мкм. Нанесение покрытия Ti–C–Mo–S осуществляли на комбинированной установке «Композит-3», созданной на базе установки ННВ 6.6-И1 с паромасляной откачкой рабочей камеры и магнетронной распылительной системы от установки МИР-2 [17]. Покрытие наносили одновременно на оба образца из указанных сталей при их непрерывном вращении относительно двух распыляемых катодных мишеней. При формировании градиентно-композиционной структуры покрытия использовали прием предварительного магнетронно-плазменного легирования поверхностного слоя подложки путем магнетронного распыления СВС-катодов Ti–C–Mo–S и ассистирующего воздействия на подложку высокоплот-

ной газоразрядной плазмой, формируемой автономным плазмогенератором ПИНК (плазменным источником с накаливаемым катодом) [18]. Последующее магнетронное осаждение покрытия также осуществляли при ассистирующем воздействии плазмогенератора ПИНК [16]. В качестве рабочего газа использовали аргон. Мощность магнетронного разряда на каждой катодной мишени составляла порядка 1,0 кВт. Потенциал смещения на подложках составлял 1200 В в процессе магнетронно-плазменного легирования и 200 В во время осаждения покрытия. Для предотвращения снижения твердости термообработанных сталей температуру образцов-подложек поддерживали не более 400 °С путем регулирования тока ассистирующего газового разряда, генерируемого источником ПИНК. При расстоянии от мишени до подложек 230 мм и времени осаждения 60 мин формировалось покрытие толщиной порядка 1,3 – 1,5 мкм. Анализ компонентного состава легированного поверхностного слоя и самого покрытия осуществляли методом оже-спектроскопии на приборе «Шхуна-2». Фрикционные испытания проводили на трибометре «ТНТ-S-AX000» (CSM) по схеме неподвижный индентор – вращающийся исследуемый образец в виде диска с нанесенным покрытием (pin-on-disk). В качестве индентора использовали шарики из закаленной (до HRC 62 – 63) стали ШХ-15. Диаметр шариков составлял 3 мм. Нагрузка на индентор во всех испытаниях составляла 1 Н. Линейную скорость перемещения контртел относительно друг друга устанавливали в диапазоне 50 – 60 см/с. Значение коэффициента трения отслеживали в зависимости от количества оборотов диска. Методами оптической (на приборах ИМЦ и МЕТАМ РВ-21) и электронной микроскопии (на растровом электронном микроскопе «Tescan Vega 3») исследовали треки износа на дисках с покрытием, а также области вокруг отпечатков Роквелла. Сравнительную оценку степени износа покрытий на подложках из разных сталей осуществляли непосредственно после критического возрастания коэффициента трения до 0,2 и более. Износ определяли путем вычисления усредненной по девяти измерениям площади поперечного сечения трека износа на приборе «Micro Measure 3D Station» (STIL).

При сравнительном анализе выявлено, что глубина распределения легирующих элементов в поверхностном слое подложек на стали 40X больше, чем на стали 20X13, и составляет порядка 500 нм [19]. По-видимому, это связано с различием химического состава подложек. Можно предположить, что высокая реакционная способность хрома (способность образовывать химические соединения по типу оксидов и карбидов при паромасляной откачке рабочей камеры) и его гораздо большее содержание в стали 20X13 по сравнению со сталью 40X ограничивает глубину диффузии при легировании подложки из стали 20X13. Подтверждением этого предположения служит анализ результатов оп-

тического исследования отпечатков Роквелла, которые получены на покрытии, осажденном на подложки из указанных сталей. После протравливания их 4 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте наблюдается существенное различие в характере разрушения покрытия и окрасе области вокруг отпечатка для стали 20X13 в сравнении со сталью 40X (рис. 1).

Ярко выраженная разница в окрасе областей, прилегающих к границе отпечатка (без покрытия), свидетельствует о значимых различиях химико-фазового состава основы и легированного подслоя.

Результаты фрикционных испытаний покрытия Ti–C–Mo–S, нанесенного на подложки из сталей двух марок, показаны на рис. 2.

Коэффициент трения (μ) покрытия на стали 40X уменьшался от 0,11 на стадии приработки до 0,09. Та-

кое значение коэффициента трения сохраняется вплоть до 38 000 оборотов (около 3000 м пути скольжения), а далее наблюдается резкое увеличение значения μ вследствие износа покрытия (рис. 2, а). При исследовании покрытия на стали 20X13 при тех же условиях фрикционных испытаний установлено, что коэффициент трения первоначально снижается с 0,09 до 0,07 (но такое значение сохраняется лишь до 18 000 оборотов диска), а далее значение μ резко увеличивается из-за износа покрытия (рис. 2, б). Подтверждением различия в характере изнашивания покрытия на исследованных сталях служат результаты оптической и электронно-растровой микроскопии треков износа (рис. 3, 4).

Методом оптической микроскопии исследовали треки изнашивания после приработки, но еще до полного износа покрытия (то есть при значениях коэффициента

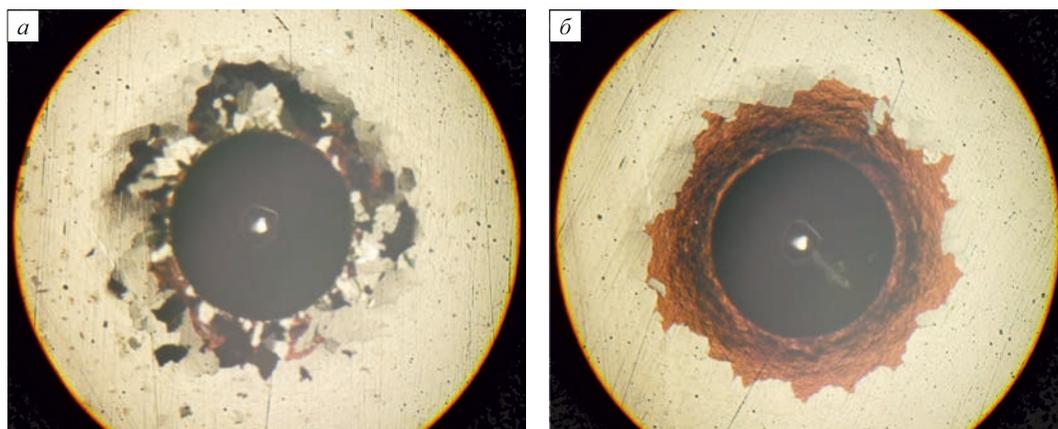


Рис. 1. Вид протравленных областей вокруг отпечатков Роквелла на стали 40X (а) и стали 20X13 (б) с нанесенным покрытием Ti–C–Mo–S

Fig. 1. Etched area view around Rockwell's prints for 40Kh (a) and 20Kh13 (b) steels with Ti–C–Mo–S coating

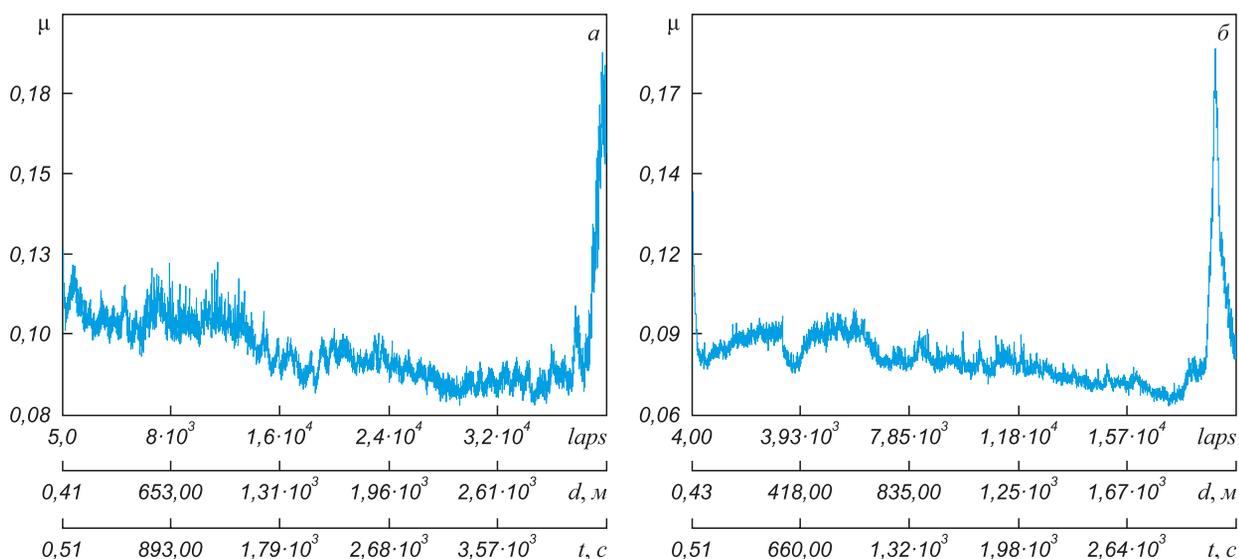


Рис. 2. Изменение коэффициента трения μ в зависимости от количества оборотов образца-диска с покрытием Ti–C–Mo–S, нанесенного на сталь 40X (а) и сталь 20X13 (б)

Fig. 2. Friction coefficient value changings depending on number of sample - disc rounds with Ti–C–Mo–S coating, sputtered on 40Kh (a) and 20Kh13 (b) steels

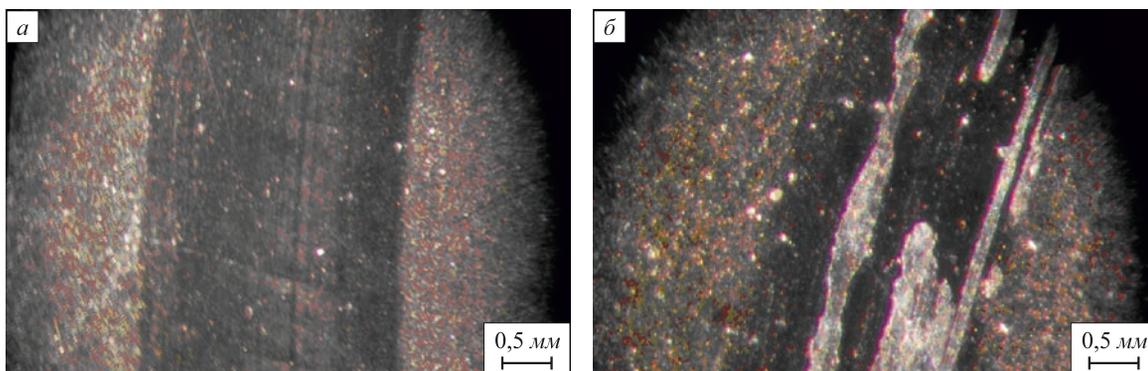


Рис. 3. Характер изнашивания покрытия Ti–C–Mo–S на треке износа на подложке из стали 40X (а) и на подложке из стали 20X13 (б) (оптическая микроскопия)

Fig. 3. Ti–C–Mo–S coating damage character on wear track sputtered on substrate of 40Kh (a) and 20Kh13 (b) steels (optical microscopy)

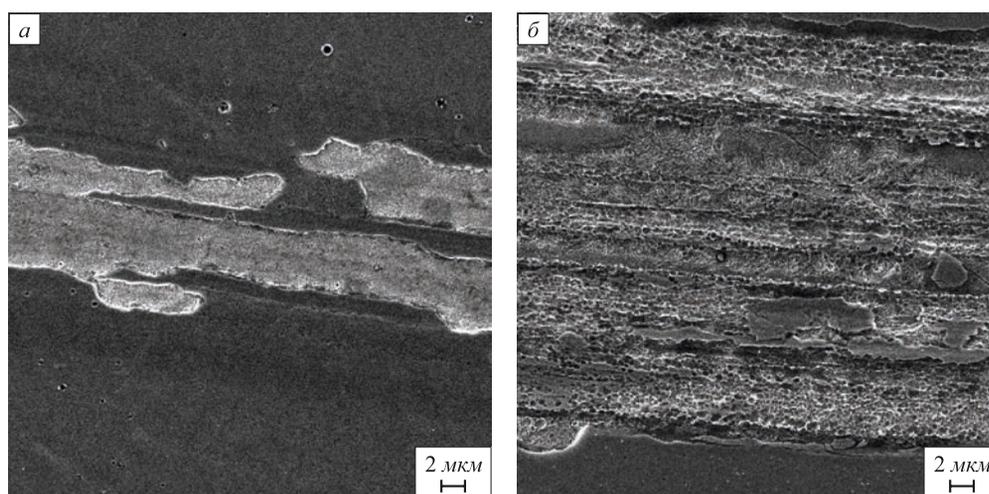


Рис. 4. Характер разрушения покрытия Ti–C–Mo–S на треке износа на подложке из стали 40X (а) и на подложке из стали 20X13 (б) (растровая электронная микроскопия)

Fig. 4. Ti–C–Mo–S coating damage character on wear track sputtered on substrate of 40Kh (a) and 20Kh13 (b) steels (electron scanning microscopy)

трения 0,09–0,07). На стали 20X13 разрушение покрытия в результате фрикционного взаимодействия с контртелом носит «лепестковый» характер, покрытие отслаивается крупными и протяженными в направлении трека частицами (рис. 3, б). Методом электронной микроскопии исследовали треки износа непосредственно после возрастания значения коэффициента трения до 0,2. Покрытие на стали 20X13 изнашивалось практически по всей площади дорожки износа после 18 000 оборотов образца-подложки, наблюдается явное изнашивание самого материала подложки (рис. 4, б). При этом, судя по морфологии изношенной поверхности подложки, адгезионная составляющая взаимодействия стального индентора со стальной подложкой вносит существенный вклад в механизм износа.

На стали 40X (рис. 4, а) покрытие полностью не изнашивалось даже после 38 000 оборотов образца. Результаты (рис. 3, а, 4, а) свидетельствуют о более высокой прочности сцепления покрытия с подложкой из

стали 40X по сравнению со сталью 20X13. Но нужно отметить, что примерно при 38 000 оборотах характер износа покрытия на стали 40X также носит лепестковый характер с отслоением частиц покрытия. Согласно данным работы [20] при скольжении индентора по поверхности образца перед ним образуется зона сжатия, а за ним – зона растяжения. В результате возникает знакопеременный цикл нагружения в материале покрытия, вследствие чего в нем накапливаются повреждения, ослабляющие прочность его сцепления с подложкой. Это обусловлено циклическим характером взаимодействия контртела с покрытием, то есть с накоплением со временем цикловой усталости.

Сравнительная оценка интенсивности изнашивания покрытия Ti–C–Mo–S по усредненной площади поперечного сечения трека износа показала, что на стали 40X она составляет порядка 3,3 мкм² на 1000 оборотов диска, а на стали 20X13 – порядка 12 мкм² на 1000 оборотов. Эти данные коррелируют с ранее изложенными

результатами по изменению значения коэффициента трения и количеству оборотов дисков с покрытием до его катастрофического износа (рис. 2), а именно, 38 000 оборотов для стали 40X и 18 000 оборотов для стали 20X13.

Выводы. Выявлена существенная разница в показателях ресурса работы покрытия на разных материалах подложки в сравнении малолегированной хромом (порядка 1 %) стали 40X, где износостойкость более высокая, с высоколегированной хромом (порядка 13 %) сталью 20X13. Авторы полагают, что это, в первую очередь, обусловлено различием таких свойств, как исходный химико-фазовый состав материалов подложки, определяющий физико-механические свойства легированного поверхностного слоя подложки, прочность сцепления (адгезия) покрытия с подложкой и, в конечном счете, механизм изнашивания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Musil J., Vlček J. Physical and mechanical properties of hard nanocomposite films prepared by magnetron sputtering. – In book: Proceedings of 5th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Vol. 3. – Tomsk, 2000. P. 393 – 398.
- Савостиков В., Борисов Д., Сергеев С., Коротаев А., Пинжин Ю. Nanostructure Superhard Coatings and Technological Design of Gradient-Packet Macrostructures // Изв. вузов. Физика. 2006. № 8. Приложение. С. 502 – 507.
- Houška J., Vlček J., Hřeben S., Bilek M.M.M., McKenzie D.R. Effect of B and the Si/C ratio on high-temperature stability of Si – B – C – N materials // Europhysics Letters. 2006. Vol. 76. P. 512 – 518.
- Musil J., Daniel R., Zeman P., Takai O. Structure and properties of Zr – Si – N films with a high (≥ 25 at.%) Si content // Thin Solid Films. 2005. Vol. 478. P. 238 – 247.
- Ma S.L., Ma D.Y., Guo Y., Xu B., Wu G.Z., Xu K.W., Paul K. Synthesis and characterization of super hard, self-lubricating Ti – Si – C – N nanocomposite coatings // Acta Materialia. 2007. Vol. 55. P. 6350 – 6355.
- Kwang Ho Kim, Jung Tae Ok, Sudeep Abraham, Young-Rae Cho, In-Wook Park, John J. Moore. Syntheses and mechanical properties of Ti – B – C – N coatings by a plasma-enhanced chemical vapor deposition // Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 201. P. 4185 – 4189.
- Su Y.L., Kao W.H. Tribological behavior and wear mechanism of MoS₂ – Cr coatings sliding against various counterbody // Tribology International. 2003. Vol. 36. P. 11 – 23.
- Ersin Arslan, Özlem Baran, Ihsan Efeoglu, Yasar Totik. Evaluation of adhesion and fatigue of MoS₂ – Nb solid-lubricant films deposited by pulsed-dc magnetron sputtering // Surf. Coat. Technol. 2008. Vol. 202. P. 2344 – 2348.
- Steinmann M., Muller A., Meerkamm H. A new type of tribological coating for machine elements based on carbon, molybdenum disulphide and titanium diboride // Tribology International. 2004. Vol. 37. P. 879 – 885.
- Ihsan Efeoglu. Co-sputtered Mo:S:C:Ti:B based coating for tribological applications // Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 200. P. 1724 – 1730.
- Musil J., Novák P., Čerstvý R., Soukup Z. Tribological and mechanical properties of nanocrystalline-TiC/ α -C nanocomposite thin films // J. Vac. Sci. Technol. A. 2010. Vol. 28. No. 2 (Mar/Apr). P. 244 – 249.
- Novák P., Musil J., Čerstvý R., Jäger A. Coefficient of friction and wear of sputtered α -C thin coatings containing Mo // Surface and Coatings Technology. 2010. Vol. 205. P. 1486 – 1490.
- Rahman Mahfujur, Haider Julfikar, Dowling D.P., Duggan P., Hashmi M.S.J. Investigation of mechanical properties of TiN + MoS_x coating on plasma-nitrided substrate // Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 200. P. 1451 – 1457.
- Gangopadhyay S., Acharya R., Chattopadhyay A.K., Paul S. Pulsed DC magnetron sputtered MoS_x-TiN composite coating for improved mechanical properties and tribological performance // Surface and Coatings Technology. 2009. Vol. 203. P. 3297 – 3305.
- Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C., Witts J., Allen T., Teer D.G. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-based coatings // Surface and Coating Technology. 2001. Vol. 142-144. P. 67 – 77.
- Пат. 2502828 РФ. Способ нанесения антифрикционного износостойкого покрытия на титановые сплавы / В.М. Савостиков, А.Н. Табаченко, А.И. Потехаев, Е.Ф. Дударев; заявл. 18.06.2012; опубл. 27.12.2013. Бюл. № 36.
- Савостиков В.М., Потехаев А.И., Табаченко А.Н. Физико-технические основы создания градиентно-слоистых поверхностей многокомпонентного состава совмещением методов ионно-диффузионного насыщения, магнетронного и вакуумно-дугового осаждения // Изв. вузов. Физика. 2011. № 7. С. 26 – 34.
- Пат. 2116707 РФ. Устройство для создания низкотемпературной газоразрядной плазмы / Д.П. Борисов, Н.Н. Коваль, П.М. Щанин; заявл. 06.01.1997; опубл. 27.07.1998. Бюл. № 21.
- Savostikov V.M., Potekaev A.I., Tabachenko A.N., Shulepov I.A., Kuzmichenko V.M., Didenko A. Gradient-layered tribological coatings based on Mo – S – Ti – C, created by the combined ion-plasma methods // Russian Physics Journal. 2012. Vol. 11. P. 1232 – 1240.
- Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. С. 285, 286.

Поступила 3 февраля 2017 г.

DIFFERENCES IN PHYSICAL-TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF ANTI-FRICTION ION-PLASMA Ti–C–Mo–S COATING DEPOSITED ON 20Kh13 AND 40Kh STEELS

A.Y. Shubin^{1,2}, A.I. Potekaev², V.M. Savostikov²,
A.N. Tabachenko², S.V. Galsanov²

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract. The results of comparative studies of tribological and physical properties of Ti–C–Mo–S multicomponent composition antifriction coating deposited by combined magnetron-plasma method on 40Kh and 20Kh13 steel templates are presented. Coating on 40Kh

and 20Kh13 steel templates is formed in a single batch, i.e. under the same conditions and with the same technological regimes by magnetron sputtering of cathodes made by SHS synthesis and assistance of high-density gas-discharged plasma formed by HCPS plasma source. The work shows technological methods used in coating. After the coating is formed, templates were subjected to friction tests on tribometer using “pin-on-disk” scheme, linear relative speed of counter-faces was 50 – 60 cm/s. The obtained results showed a significant difference in tribological characteristics of coating, depending on template material, wear resistance in the first place. A significant difference in service life

of coating on templates produced of different materials was found by comparing low-alloy chromium (about 1 %) 40Kh steel (higher wear resistance) to high-chrome chromium (about 13 %) 20Kh13 steel. Results of optical microscopy and ESM of wear and tear tracks are presented, difference in nature and degree of wear of coating formed on templates made of 40Kh and 20Kh13 steels is revealed. Using electronic profilometer, specific wear of coating per 1000 rotations of disk was estimated based on average cross-section area of friction track: cross-section area of coating wear track of 20Kh13 steel template coating is four times larger than that of 40Kh steel template. A comprehensive analysis of physical and tribological study results suggests that observed difference is primarily due to different initial chemical-phase composition and differences in structure of substrate materials used in experiment that determine properties of alloyed surface layer and adhesion strength of coating and, ultimately, wear mechanism.

Keywords: magnetron plasma sputtering method, anti-friction coating, multi-component coating, tribology, friction, wear, friction coefficient, wear-resistance.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-12-966-971

REFERENCES

- Musil J., Vlček J. Physical and mechanical properties of hard nanocomposite films prepared by magnetron sputtering. In: *Proceedings of 5th International conference on modification of materials with particle beams and plasma flows*. Vol. 3. Tomsk, 2000, pp. 393–398.
- Savostikov V., Borisov D., Sergeev S., Korotaev A., Pinzhin Yu. Nanostructure superhard coatings and technological design of gradient-packet macrostructures. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2006, no. 8, pp. 502–507. (In Russ.).
- Houška J., Vlček J., Hřeben S., Bilek M.M.M., McKenzie D.R. Effect of B and the Si/C ratio on high-temperature stability of Si – B – C – N materials. *Europhysics Letters*. 2006, vol. 76, pp. 512–518.
- Musil J., Daniel R., Zeman P., Takai O. Structure and properties of Zr – Si – N films with a high (≥ 25 at.%) Si content. *Thin Solid Films*. 2005, vol. 478, pp. 238–247.
- Ma S.L., Ma D.Y., Guo Y., Xu B., Wu G.Z., Xu K.W., Paul K. Synthesis and characterization of super hard, self-lubricating Ti – Si – C – N nanocomposite coatings. *Acta Materialia*. 2007, vol. 55, pp. 6350–6355.
- Kwang Ho Kim, Jung Tae Ok, Sudeep Abraham, Young-Rae Cho, In-Wook Park, John J. Moore. Syntheses and mechanical properties of Ti – B – C – N coatings by a plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Surface and Coatings Technology*. 2006, vol. 201, pp. 4185–4189.
- Su Y.L., Kao W.H. Tribological behavior and wear mechanism of MoS₂ – Cr coatings sliding against various counterbody. *Tribology International*. 2003, vol. 36, pp. 11–23.
- Ersin Arslan, Özlem Baran, Ihsan Efeoglu, Yasar Totik. Evaluation of adhesion and fatigue of MoS₂ – Nb solid-lubricant films deposited by pulsed-dc magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.* 2008, vol. 202, pp. 2344–2348.
- Steinmann M., Muller A., Meerkamm H. A new type of tribological coating for machine elements based on carbon, molybdenum disulphide and titanium diboride. *Tribology International*. 2004, vol. 37, pp. 879–885.
- Ihsan Efeoglu. Co-sputtered Mo:S:C:Ti:B based coating for tribological applications. *Surface and Coatings Technology*. 2005, vol. 200, pp. 1724–1730.
- Musil J., Novák P., Čerstvý R., Soukup Z. Tribological and mechanical properties of nanocrystalline-TiC/ α -C nanocomposite thin films. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2010, vol. 28, no. 2 (Mar/Apr), pp. 244–249.
- Novák P., Musil J., Čerstvý R., Jäger A. Coefficient of friction and wear of sputtered α -C thin coatings containing Mo. *Surface and Coatings Technology*. 2010, vol. 205, pp. 1486–1490.
- Rahman Mahfujur, Haider Julfikar, Dowling D.P., Duggan P., Hashmi M.S.J. Investigation of mechanical properties of TiN + MoS_x coating on plasma-nitrided substrate. *Surface and Coatings Technology*. 2005, vol. 200, pp. 1451–1457.
- Gangopadhyay S., Acharya R., Chattopadhyay A.K., Paul S. Pulsed DC magnetron sputtered MoS_x-TiN composite coating for improved mechanical properties and tribological performance. *Surface and Coatings Technology*. 2009, vol. 203, pp. 3297–3305.
- Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C., Witts J., Allen T., Teer D.G. Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS₂-based coatings. *Surface and Coating Technology*. 2001, vol. 142–144, pp. 67–77.
- Savostikov V.M., Tabachenko A.N., Potekaev A.I., Dudarev E.F. *Sposob naneseniya antifriktsionnogo iznosostoikogo pokrytiya na titanovye splavy* [Method of applying antifriction wear-resistant coating to titanium alloys]. Patent RF no. 2502828. *Byulleten' izobretanii*. 2013, no. 36. (In Russ.).
- Savostikov V.M., Potekaev A.I., Tabachenko A.N. Physical and technological principles of designing layer-gradient multicomponent surfaces by combining the methods of ion-diffusion saturation and magnetron- and vacuum-arc deposition. *Russian Physics Journal*. 2011, vol. 54, no. 7, pp. 756–764.
- Borisov D.P., Koval' N.N., Shchanin P.M. *Ustroistvo dlya sozdaniya nizkotemperaturnoi gazorazryadnoi plazmy* [Device for creating low-temperature gas-discharged plasma]. Patent RF no. 2116707. *Byulleten' izobretanii*. 1998, no. 21. (In Russ.).
- Savostikov V.M., Potekaev A.I., Tabachenko A.N., Shulepov I.A., Kuzmichenko V.M., Didenko A. Gradient-layered tribological coatings based on Mo – S – Ti – C, created by the combined ion-plasma methods. *Russian Physics Journal*. 2012, vol. 11, pp. 1232–1240.
- Kragel'skii I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Basics of friction and wear design calculations]. Moscow: Mashinostroenie, 1977, pp. 285–286. (In Russ.).

Information about the authors:

A.Y. Shubin, Postgraduate of the Chair of Precision Instrumentation (ayshubin@gmail.com)

A.I. Potekaev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor, Director of Siberian Physics and Technics Institute (SPTI TSU), Head of the Laboratory of Advanced Materials and Technologies (kanc@spti.tsu.ru)

V.M. Savostikov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Technologist (svm.53@mail.ru)

A.N. Tabachenko, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory (tabachenko@spti.tsu.ru)

S.V. Galsanov, Cand. Sci. (Eng.), Research Engineer (s_galsanov@mail.ru)

Received February 3, 2017