

М.А. Волосова¹, А.П. Митрофанов², Я.Р. Мелешкин³, С.В. Федоров⁴

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ДИБОРИДА ТИТАНА В УСЛОВИЯХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ



¹Марина Александровна Волосова,
Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499) 972-94-29, E-mail: m.volosova@stankin.ru.



²Артем Петрович Митрофанов,
Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499) 972-94-29, E-mail: a.mitrofanov@stankin.ru



³Ярослав Романович Мелешкин,
Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499) 972-94-29, E-mail: ya.meleshkin@stankin.ru.



⁴Сергей Вольдемарович Федоров,
Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499) 972-94-29, E-mail: sv.fedorov@stankin.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы влияния теплового воздействия на трибологические свойства покрытия TiB_2 в сопоставление с известным и часто применяемым на режущие пластины покрытием $TiAlSiN$. Результаты показали, что противоизносные свойства TiB_2 более ярко выражены относительно покрытия $TiAlSiN$, причем данное утверждение справедливо для всех вариантов испытаний с равномерным характером

изнашивания покрытия TiB_2 . Установлено, что температурное воздействие оказывает положительное влияние на коэффициент трения покрытия TiB_2 снижая его вплоть до величины 0,1 с формированием антифрикционной пленки которая под действием механических нагрузок срывается с резким увеличением коэффициента трения, в результате чего поверхность покрытия находится в динамическом процессе «окисление – изнашивание – удаление». Такой механизм обеспечивает стабильный и равномерный износ покрытия, тогда как у покрытия $TiAlSiN$ происходит полная деструкция с частичным повреждением подложки.

Ключевые слова: покрытие TiB_2 , коэффициент трения, морфология дорожки трения, износостойкость, элементный анализ, тепловое воздействие.

Введение

Всесторонний анализ показывает, что сегодня одним из мировых трендов в области разработки покрытий, которые смогли бы обеспечить повышенную износоустойчивость инструмента при повышенных теплосиловых нагрузках, является формирование на рабочих поверхностях инструментов покрытий на базе диборидов тугоплавких металлов MeB_2 . Дибориды обладают стойкостью к окислению при высоких температурах за счет формирования на их поверхностях трибопленок. В настоящее время одним из основных мировых трендов в области развития износоустойчивых покрытий для нужд инструментального производства является применение боридов переходных металлов Ti (наиболее термостабильной модификации MeB_2) [1-5].

Химическое соединение TiB_2 имеет ковалентную связь между атомами и относительно распространенных нитридов тугоплавких металлов, в которых кроме ковалентной имеет место металлическая связь, обладает более высокой твердостью, улучшенными барьерными свойствами и менее интенсивным адгезионным схватыванием при высокотемпературном трении [1, 3, 6]. Покрытия TiB_2 относятся к классу, так называемых адаптивных покрытий, принцип функционирования которых заключается в том, что структура, состав и свойства покрытия изменяются в зависимости от внешних условий для минимизации трения за счет образования стабильных защитных оксидных слоев и высокотемпературных смазочных оксидов [7-9].

Одновременно с указанными выше уникальными благоприятными особенностями покрытия TiB_2 характеризуются значительными недостатками, ограничивающими их практическое применение – повышенная хрупкость (высокий модуль упругости) и сравнительно невысокая прочность адгезионной связи с инструментальными

подложками, значительно усугубляющаяся по мере увеличения толщины покрытий [3, 5, 10].

Имеющиеся в научно-технической литературе данные об исследовании покрытий TiB_2 в процессе резания фрагментарны и во многом противоречивы [11-13]. Кроме того, большинство авторов проводит испытания твердосплавных пластин с покрытиями в процессе точении при невысоких скоростях резания, т.е. в «комфортных» условиях, когда режущая кромка и контактные поверхности не подвергаются экстремальным термическим и циклическим механическим нагрузкам, которые характерны для фрезерования труднообрабатываемых сплавов на повышенных скоростях резания [14-16].

В рамках выполнения работы поставлена задача исследования влияния условий контактного взаимодействия в зоне резания на функциональные свойства покрытий, в том числе с диборидом титана, экспериментально реализованное посредством трибологических испытаний с различными вариантами температурного воздействия.

Методы

При экспериментах по нанесению покрытий на образцы использовали гибридную вакуумно-плазменную установку, оснащенную магнетронной распылительной системой с мишенью TiB_2 и двумя вакуумно-дуговыми испарителями с катодами $AlSi$ и Ti . Формировали два варианта покрытий при следующих режимах:

1) покрытие $TiAlSiN$ осаждали при давлении 1,2 Па в вакуумной камере в газовой смеси Ar/N_2 при соотношении 5/95 об. %. и напряжении смещения 120 В на вращающемся столе с образцами. Осаждение выполняли при температуре 500 °С в рабочей камере, токе дуги 90 А на катоде Ti и 80 А на катоде $AlSi$; время осаждения составляло 40 мин, что обеспечило толщину $2,8 \div 3$ мкм покрытия $TiAlSiN$;

2) покрытие TiB_2 (с подслоем $TiAlSiN$) осаждали при давлении 0,6 Па в вакуумной камере при распылении мишени TiB_2 , полученной искровым плазменным спеканием в газовой среде Ar при подаче на мишень импульсного напряжения с частотой 30 кГц. Осаждение выполняли при температуре 500 °С в рабочей камере, напряжении смещения 50 В и разрядном напряжении 400 В; время осаждения составляло 60 мин, что обеспечило толщину $2,3 \div 2,5$ мкм покрытия TiB_2 и промежуточным нитридным слоем толщиной ~2 мкм;

С целью исследования влияния различных условий термо-механического воздействия на функциональные свойства покрытий при проведении исследований были реализованы три варианта эксперимента: испытания при комнатной температуре (1), испытания после

предварительного нагрева образцов в муфельной печи при температуре 700 °С в течение 60 минут (2), испытания непосредственно в термокамере трибометра при поддержании температуры на уровне 700 °С в течение всего периода испытаний (3).

Трибологические испытания осуществляли с усилием 10 N и скоростью вращения 10 см/с на трибометре DUCOM POD-4.0 (контртела – шарик из Al_2O_3 для керамических образцов, шарик WC – для образцов из твердого сплава). Применяемая схема – Pin-on-Disk (ASTM G99), путь трения – 500 метров. Общий вид экспериментальной установки для трибологических испытаний представлен на рис. 1.

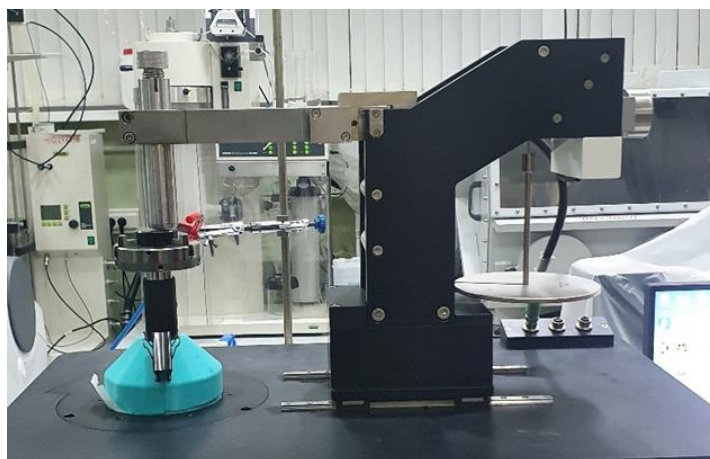


Рис. 1. Общий вид установки для трибологических испытаний

Для оценки износа покрытий после трибологических испытаний проводили измерение дорожки трения на образцах с использованием стилусного профилометра Dektak XT. Детальное исследование дорожек трения проводили на растровом электронном микроскопе VEGA3 TESCAN (Чехия).

Исходные сведения об экспериментальных образцах и условиях трибологических испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1. Условия эксперимента

№ Образца	1	2	3	4	5	6
Покрытие	TiAlSiN	TiAlSiN/ TiB ²	TiAlSiN	TiAlSiN/ TiB ²	TiAlSiN	TiAlSiN/ TiB ²
Условия испытаний*	1	1	2	2	3	3

* 1 - испытания при комнатной температуре, 2 - испытания после предварительного нагрева образцов в муфельной печи, 3 - испытания при нагреве в термокамере трибометра

Результаты

Результаты трибологических испытаний (оценки коэффициента трения) образцов № 1 и 2 при комнатной температуре представлены на рис. 2.

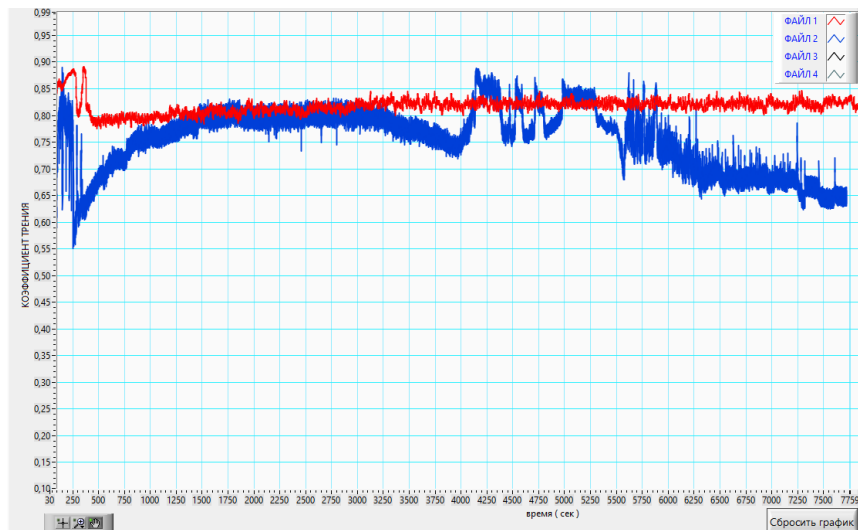


Рис. 2. Результаты оценки коэффициента трения образцов №1 (синий) и №2 (красный) при комнатной температуре

Можно видеть, что после стадии приработки у образца № 1 с покрытием TiAlSiN происходит постепенное увеличение коэффициента трения с выходом на стабильный уровень со значением 0,8, определяющим контактное взаимодействие покрытия с контртелом. Нестабильный характер кривой коэффициента трения при испытании покрытия TiAlSiN во второй половине дистанции отражает деструктивные процессы, в результате которых наблюдается разрушение покрытия. Напротив, при испытании покрытия TiB_2 , за исключением этапа первоначальной приработки, на протяжении всего эксперимента отмечается стабильный характер изменения коэффициента трения со значением на уровне немногим более 0,8. Такой результат говорит о равномерном характере износа покрытия.

Морфология дорожки трения и элементное картирование (рис. 3) показывают, что покрытие TiAlSiN изнашивается до подложки в результате трибологических испытаний, при этом сам износ носит равномерный характер с преимущественным абразивным истиранием. Данное заключение хорошо иллюстрируется постепенным увеличением концентрации кислорода, как одного из элементов подложки, от края дорожки и далее вглубь (рис. 3). Стоит отметить, что помимо деструкции самого покрытия наблюдается и износ подложки в центральной части дорожки трения с формированием контрастного в отличие от всей контактной поверхности следа взаимодействия с контртелом.

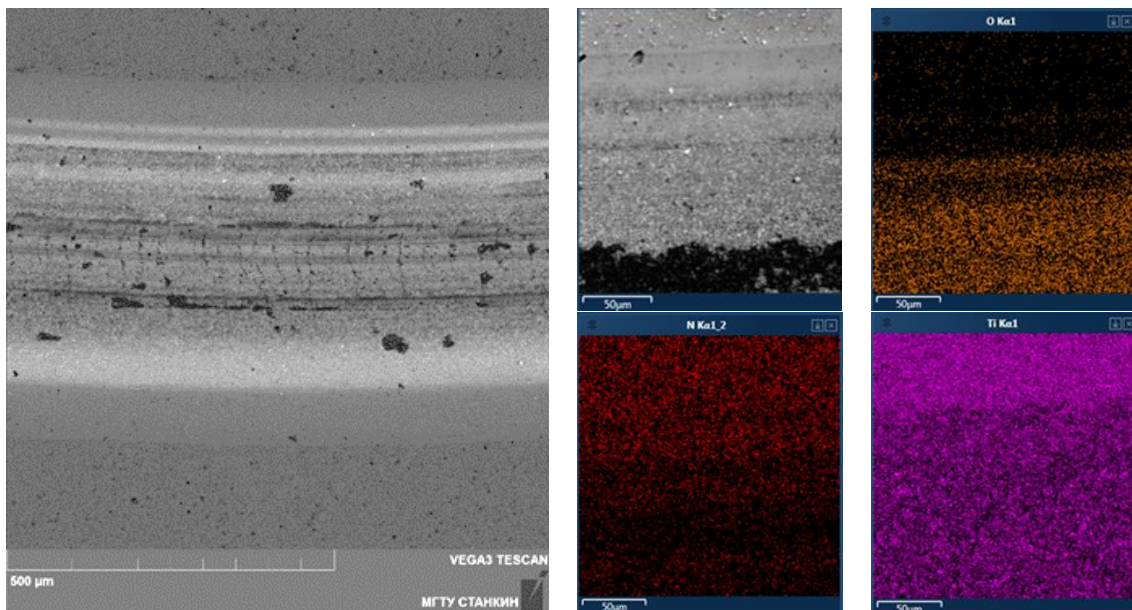


Рис. 3. Морфология дорожки трения и элементное картирование образца №1 (покрытие TiAlSiN)

Покрытие TiB_2 в результате контактного взаимодействия с контртелом имеет однородную по морфологии дорожку трения без явных проявлений процессов активного изнашивания (рис. 4). Сохраняется целостность покрытия, подтверждением чего является идентичность элементного состава не контактируемого края покрытия и дорожки трения (рис. 4).

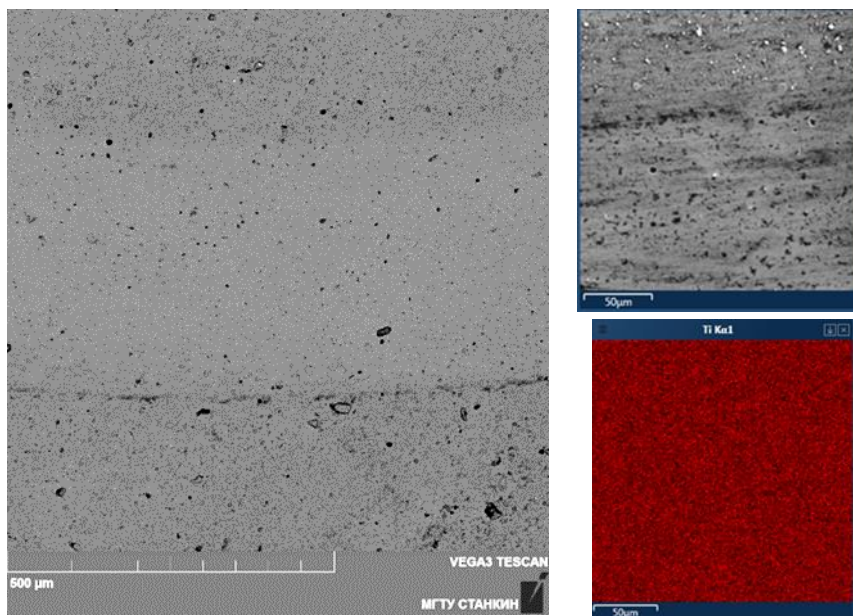


Рис. 4. Морфология дорожки трения и элементное картирование образца №2 (покрытие TiAlSiN/ TiB_2)

Предварительный нагрев образцов в муфельной печи изменяет структуру и состав поверхностного слоя в результате этого трибологические показатели значительно трансформируются. Можно наблюдать существенное снижение коэффициента трения, особенно у покрытия TiB_2 с 0,8 до 0,55 при сохранении стабильности коэффициента трения на протяжении всего цикла испытаний (рис. 5). При этом, если при испытании исходных пластин, показания коэффициента трения для обоих вариантов покрытий практически аналогичны, то сравнение нагретых образцов показывает преимущество покрытия TiB_2 в отношении снижения трения. Последнее утверждение справедливо и для случая сравнения с исходной подложкой, т.к. в конце эксперимента покрытие TiAlSiN на дорожке трения отсутствует.

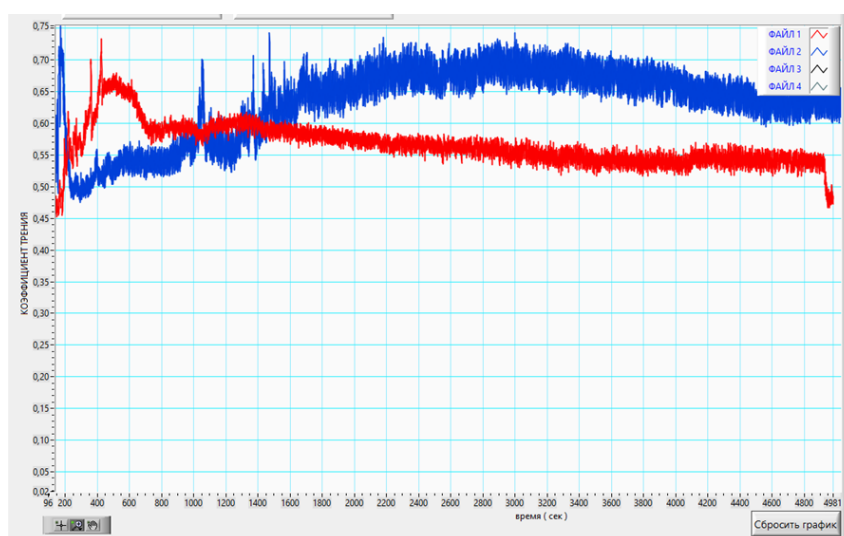


Рис. 5. Результаты оценки коэффициента трения образцов № 3 (синий) и №4 (красный) после нагрева в муфельной печи

Характер изнашивания покрытия TiAlSiN после нагрева в печи изменяется от преимущественного абразивного истирания для случая исходного состояния покрытия к хрупкому скалыванию, наблюдаемому по краям дорожки трения (рис. 6), что говорит об изменении физико-механических свойств поверхностного слоя. При этом происходит данный процесс не в результате возможного окисления покрытия при нагреве, т.к. количество кислорода на поверхности минимально (рис. 6). В ходе испытаний покрытие полностью разрушается с обнажением подложки, что отчетливо прослеживается по имеющейся резкой границе распределения основных элементов при картировании (рис. 6).

Однородность изнашивания покрытия TiB_2 при проведении трибологических испытаний предварительно нагретого образца можно наблюдать по морфологии дорожки трения, где отмечается равномерный характер абразивного износа (рис. 7). Покрытие сохраняет свою

целостность, что подтверждается контролируемым элементным составом (рис. 7). Тем не менее, происходят процессы окисления поверхностного слоя в результате нагрева образца, а концентрация кислорода постепенно снижается от края дорожки к центру, а при оценке концентрации бора наблюдается обратная тенденция (рис. 7).

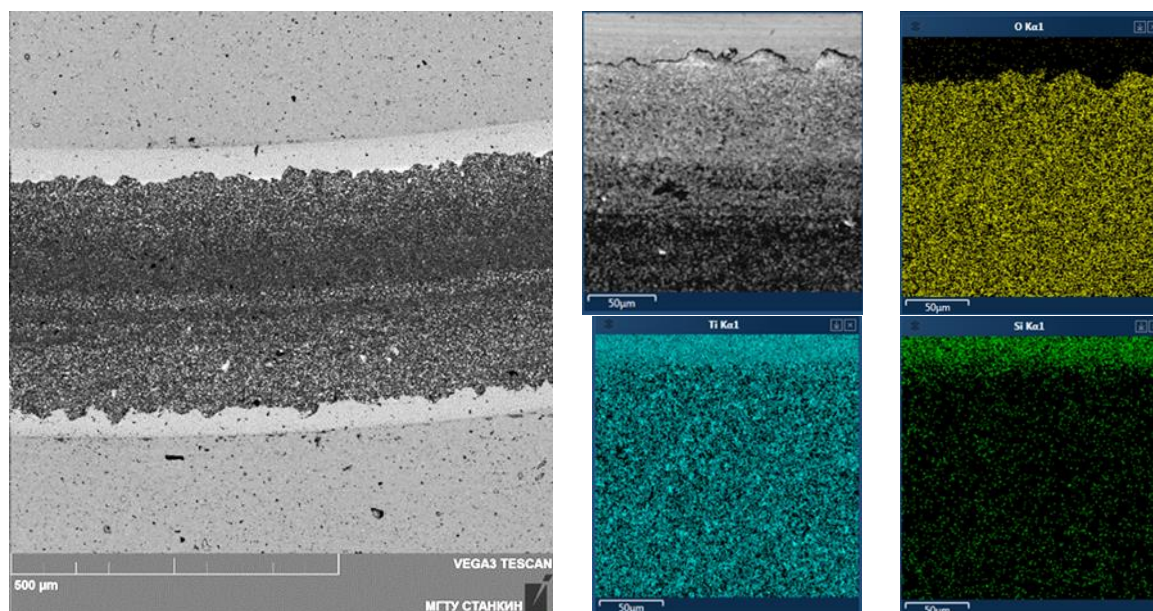


Рис. 6. Морфология дорожки трения и элементное картирование образца №3 (покрытие TiAlSiN)

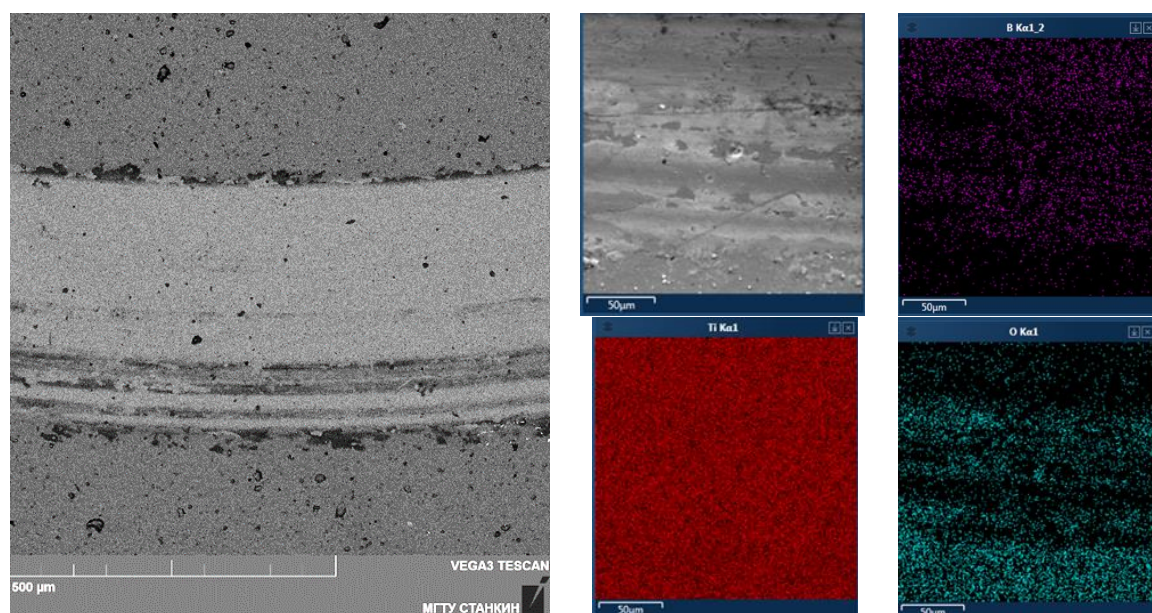


Рис. 7. Морфология дорожки трения и элементное картирование образца №4 (покрытие TiAlSiN/TiB₂)

Таким образом, в результате проведения испытаний верхний окисленный слой (оксиды титана), сформировавшиеся при предварительном нагревании образца, постепенно изнашиваются и дальнейший трибоконтакт происходит преимущественно в контакте контртела с TiB_2 .

Трибологические испытания в термокамере трибометра при температуре 700°C резко изменяют характер поведения кривых коэффициента трения. Так, у покрытия TiB_2 наблюдаются очевидные циклические процессы схватывания, сопровождающиеся повышением коэффициента трения, чередующиеся с периодами резкого падения коэффициента до значений меньше 0,1 (рис. 8). Цикличность просматривается и при испытании покрытия TiAlSiN , однако она менее ярко выражена и характеризует уже процессы адаптации подложки к условиям фрикционного контакта.

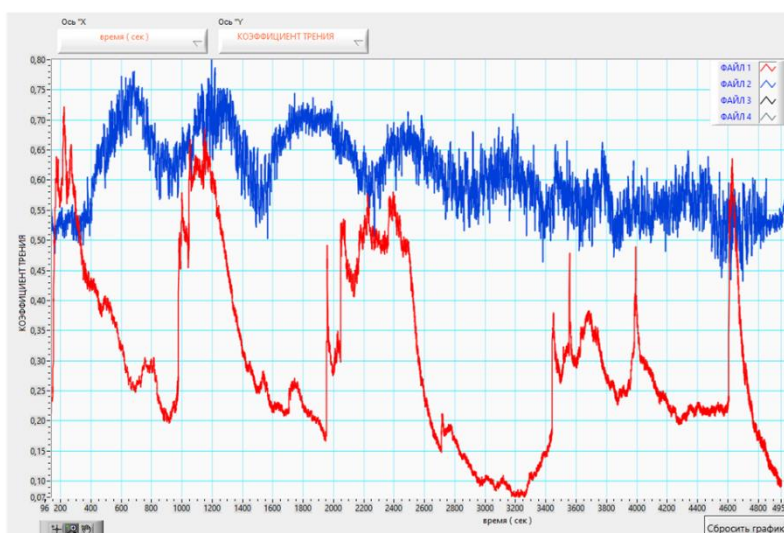


Рис. 8. Результаты оценки коэффициента трения образцов № 5 (синий) и № 6 (красный) при высокотемпературном нагреве в камере трибометра

Оценка морфологии исследуемого образца показывает наличие следов хрупкого скалывания покрытия TiAlSiN , наблюдаемого по краям дорожки трения (рис. 9). Покрытие на подложке отсутствует, ее поверхность неоднородна с явными участками схватывания и очевидными процессами разрушения контактной поверхности. Указанное однозначно иллюстрируется элементным картированием — видны резкая граница распределения основных элементов и отсутствие покрытия на дорожке трения (рис. 9). Стоит отметить, что процесса окисления покрытия в результате термовоздействия не обнаружено.

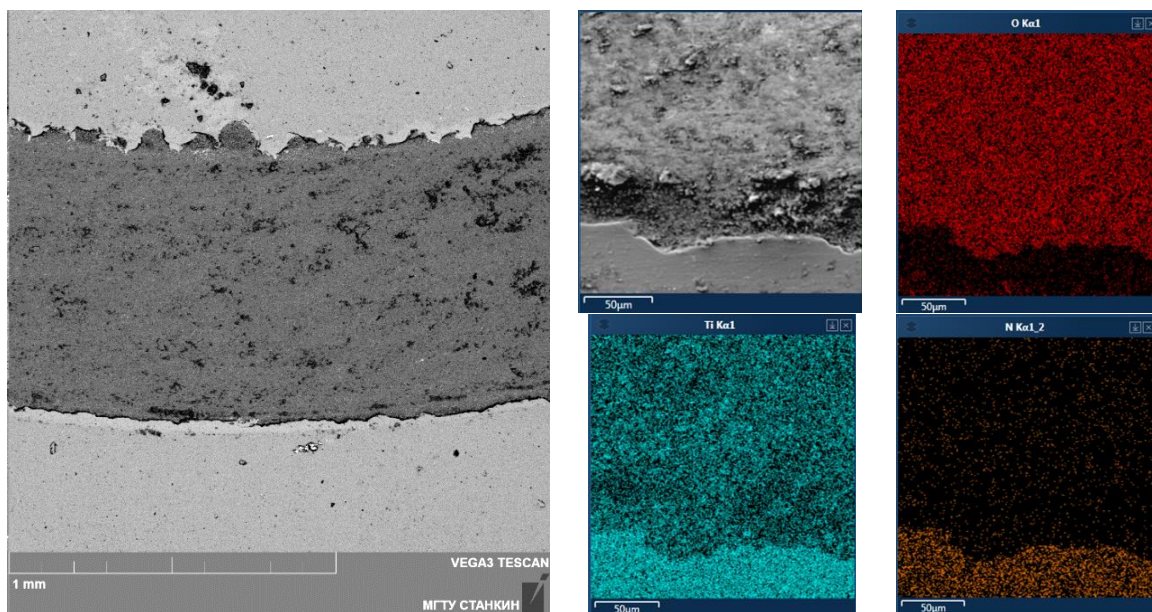


Рис. 9. Морфология дорожки трения и элементное картирование образца №5 (покрытие TiAlSiN)

Анализ результатов морфологического анализа покрытия TiB_2 показывает более резкие границы перехода от края к центру дорожки трения (рис. 10). Обнаруживается слоистость на поверхности дорожки (рис. 10), которая сформировалась в результате цикличности различных механизмов контактного взаимодействия, что, в том числе, отражается на изменении коэффициента трения в процессе трибологических испытаний.

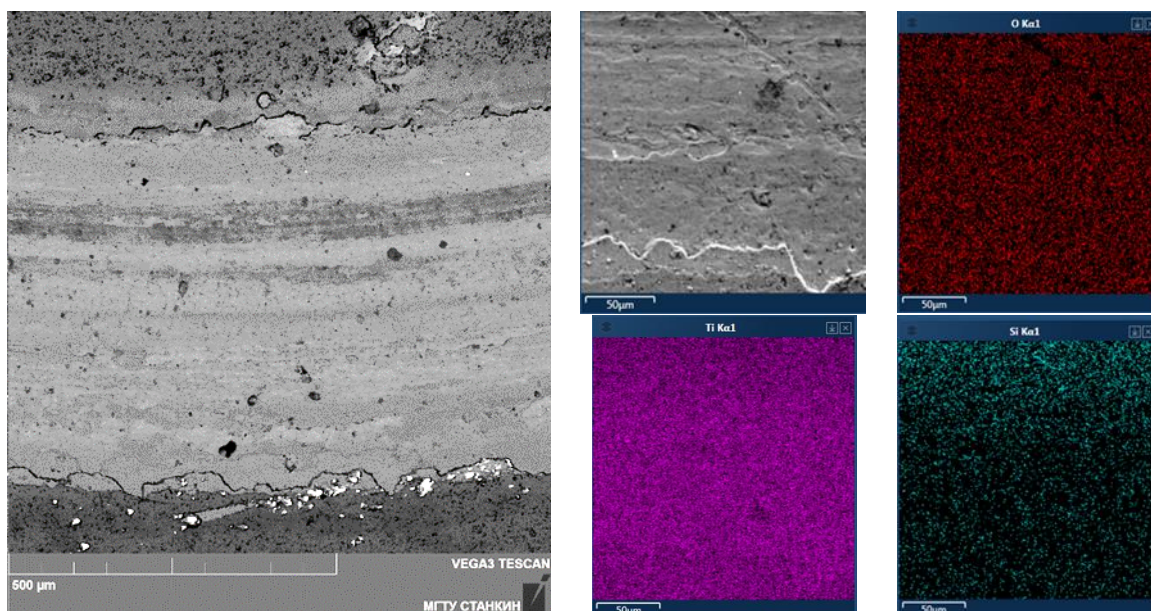


Рис. 10. Морфология дорожки трения и элементное картирование образца №6 (покрытие TiAlSiN/ TiB_2)

Элементный анализ показывает наличие значительного процесса окисления покрытия, которое характеризуется равномерным распределением кислорода по всей исследуемой поверхности. Наблюдается значительное истончение покрытия TiB_2 от края в глубь дорожки трения, что видно по постепенному увеличению концентрации элементов подслоя (Si) на исследуемом участке (рис. 10). Тем не менее, несмотря на значительный износ, верхний слой TiB_2 преимущественно сохранялся и продолжал влиять на контактные процессы до конца эксперимента.

Износостойкость покрытий дополнительно оценивали по значениям объемного износа (рис. 11), полученного в результате расчета данных, измеренных профилированием дорожки трения. Испытание исходных покрытий при комнатной температуре показывает почти двухкратное превосходство TiB_2 по износостойкости. Оценивая результаты по износоустойчивости покрытия $TiAlSiN$ после испытаний образца, нагретого в печи, можно констатировать увеличение износа дорожки трения и деструкцию покрытия по всей контактной поверхности (рис 6). Однако в отличие от покрытия $TiAlSiN$ противоизносные свойства TiB_2 после нагревания образца, наоборот, усилились, благодаря чему износостойкость возросла в 2 раза от величины испытания исходного покрытия (рис. 11). При испытаниях в условиях постоянного температурного воздействия обнаруживается катастрофический износ для покрытия $TiAlSiN$ (рис. 11), где глубина изношенной дорожки трения превышает величину толщины покрытия и происходит уже разрушение основного материала подложки. Износ покрытия TiB_2 после испытаний значительно увеличился относительно других экспериментов, но не достиг критического уровня, противоизносные свойства TiB_2 более ярко выражены чем у покрытия $TiAlSiN$.

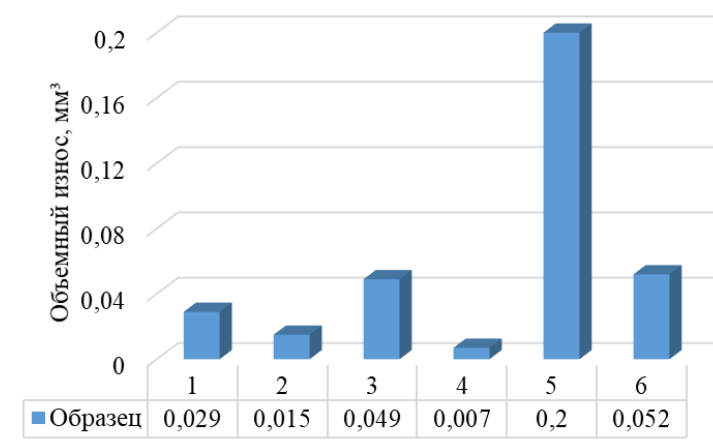


Рис. 11. Рассчитанный объемный износ дорожек трения после испытания образцов

Обсуждение

Тепловое воздействие оказывает значимый эффект на исследуемые покрытия изменяя и трансформируя их свойства и характер деструкции. Если при испытаниях с комнатной температурой наблюдается относительно высокий коэффициент трения покрытия TiB_2 который также отмечается и в работе [17], то эксперименты с воздействием температуры на покрытие TiB_2 показывают снижение фрикционной составляющей контактного взаимодействия, что особенно важно в случае резания материалов при практическом применении режущих пластин. Следует подчеркнуть важные результаты, полученные при испытании в термокамере трибометра при температуре 700 °С, где имеет место быть цикличность значений коэффициента трения с падением до величин 0,1. Соответственно в зоне контакта формируется антифрикционная пленка, при достижении критических значений нагрузок, происходит срыв контактного слоя, обнажается подлежащая поверхность и резко увеличивается коэффициент трения. Далее цикл повторяется по аналогичному сценарию. Обнаруженная в работе [16] минимизация изнашивания пластин с TiB_2 авторами объясняется образованием большого количества трибооксида B_2O_3 , таким образом обнаруженный нами эффект можно отнести к случаю влияния B_2O_3 на процессы трения. Таким образом, характер изнашивания в реальных условиях резания обеспечивает равномерный износ покрытия с низким коэффициентом трения.

Основным механизмом износа покрытия TiB_2 при испытаниях в условиях комнатной температуры являлся абразивный износ, который трансформировался в абразивный износ и окислительный износ при высокой температуре. Вне зависимости от условий испытаний наблюдается равномерный характер изнашивания покрытия. Повышенная скорость износа при высокой температуре испытаний объясняется реакцией фрикционного окисления по всей поверхности трения, в результате чего поверхность покрытия находится в динамическом процессе «окисление – изнашивание – удаление».

Противоизносные свойства TiB_2 более ярко выражены относительно покрытия TiAlSiN , причем данное утверждение справедливо для всех вариантов испытаний. Особенно это важно при экспериментах с температурным воздействием, где у покрытия TiAlSiN происходит полная деструкция с частичным износом подложки.

Заключение

В работе проведены испытания покрытий TiB_2 и TiAlSiN в исходном состоянии, после предварительного термического нагрева в печи (700 °С)

и при испытании в термокамере трибометра при температуре 700 °С. Результаты работы показали, что противоизносные свойства TiB_2 более ярко выражены относительно покрытия $TiAlSiN$, причем данное утверждение справедливо для всех вариантов испытаний и варьируется от 2 до 7 кратного повышения износостойкости в зависимости от условий эксперимента. Характер изнашивания покрытия TiB_2 в целом равномерный, тогда как у покрытия $TiAlSiN$ при испытаниях с тепловым воздействием имеет место полная деструкция с частичным повреждением подложки. Установлено, что при испытании в термокамере трибометра коэффициент трения покрытия TiB_2 снижается вплоть до величины 0,1 с формированием антифрикционной пленки, которая под действием механических нагрузок разрушается с резким увеличением коэффициента трения, в результате чего поверхность покрытия находится в динамическом процессе «окисление – изнашивание – удаление». Такой механизм обеспечивает стабильный и равномерный износ покрытия, что благоприятно будет сказываться при практическом применении в условиях контактных процессов при резании материалов. В качестве дальнейших перспектив исследования целесообразно будет провести элементный анализ тонких поверхностных слоев, сформированных на дорожках трения, чтобы определить природу химических соединений.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSFS-2023-0003)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Casais, R., Baptista, A.M., Silva, F.J., Andrade, F., Sousa, V., Marques, M.J. Experimental study on the wear behavior of B_4C and TiB_2 monolayered PVD coatings under high contact loads. 2022. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 120, pp. 6585 - 6604.
- [2] Kiryukhantsev – Korneev, P., Sytchenko, A., Kaplanskii, Y., Sheveyko, A., Vorotilo, S., Levashov, E. Structure, Corrosion Resistance, Mechanical and Tribological Properties of ZrB_2 and Zr-B-N Coatings. 2021. Metals. 11, 1194.
- [3] Schalk, N., Tkadletz, M., Mitterer, C. Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community. 2022. Surface and Coatings Technology. 429, 127949.
- [4] Petrov, I., Hall, A., Mei, A.B., Nedfors, N., Zhirkov, I., Rosen, J., Reed, A., Howe, B., Greczynski, G., Birch, J., Hultman, L., Greene, J.E. Controlling

- the boron-to-titanium ratio in magnetron-sputter-deposited TiB_x thin films. 2017. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 35(5), 050601.
- [5] Šroba, V., Fiantok, T., Truchlý, M., Roch, T., Zahoran, M., Grančič, Peter Švec, B., Nagy, S., Izai, V., Kúš, P., Mikula, M. Structure evolution and mechanical properties of hard tantalum diboride film. 2020. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 38(3), 033408.
 - [6] Solovan, M.N., Brus, V.V., Maryanchuk, P.D., Kovalyuk, T.T., Rappich, J., Gluba, M. Kinetic properties of TiN thin films prepared by reactive magnetron sputtering. 2013. *Physics of the Solid State*. 55(11), pp. 2234-2238.
 - [7] Wang, Z., Fu, T., Xie, B., Wang, H., Ye, P., Pan, X. Self-Lubricating Property of TiB_2 -Ni Coating in the Hot Forging Die of Aluminum Alloy. 2022. *Coatings*. 12, 829.
 - [8] Rao, J., Cruz, R., Lawson, K.J., Nicholls, J.R. Carbon and titanium diboride multilayer coatings. 2004. *Diamond and Related Materials*. 13, pp. 2221 - 2225.
 - [9] Shi, Y., Chen, Z., Ji, L., Xiao, G., Yi, M., Zhang, J., Chen, H., Xu, C. Cutting performance and antifriction mechanism of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{TiB}_2/\text{h-BN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ self-lubricating ceramic tool. 2023. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 125, pp. 809 - 818.
 - [10] Grigoriev, S., Volosova, M., Mosyanov, M., Fedorov, S. The Study of Radius End Mills with TiB_2 Coating When Milling a Nickel Alloy. 2023. *Materials*. 16, 2535.
 - [11] Akgün, M., Kara, F. Analysis and Optimization of Cutting Tool Coating Effects on Surface Roughness and Cutting Forces on Turning of AA 6061 Alloy. 2021. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021, pp. 466 - 472.
 - [12] Zainal1, A., Zakaria, M.H., Che Ghani, S.A. Investigation on machining performance of TiB_2 and TiN coatings with modified cutting insert in AISI 1017 turning. 2020. *IOP Conference Series: Materials Science*. 788, 012009.
 - [13] Alhadeff, L., Marshall, M., Slatter, T. The influence of tool coating on the length of the normal operating region (steady-state wear) for micro end mills. 2019. *Precision Engineering*. 60, pp. 306 - 319.
 - [14] Lee, K.W., Chung, Y.W., Korach, C., Keer, L.M. Tribological and dry machining evaluation of superhard TiB_2/TiC multilayer coatings deposited on Si(001), M2 steel, and C3 WC cutting tool inserts using magnetron sputtering. 2005. *Surface and Coatings Technology*. 194, pp. 184-189.
 - [15] Chowdhury, M.S.I., Bose, B., Fox-Rabinovich, G., Veldhuis, S.C. Investigation of the Wear Performance of TiB_2 Coated Cutting Tools during the Machining of Ti6Al4V Alloy. 2021. *Materials*. 14, 2799.

- [16] Шустер, Л.Ш., Фокс-Рабинович, Г.С., Чертовских, С.В. Влияние режимов резания на износостойкость инструментов с покрытием TiB_2 при обработке титанового сплава. 2021. Трение и износ. 42(6), С. 707-716.
- [17] Zhao, G., Wang, J., Deng Y., Yan, T., Liang, W., Li, T., Zhang, L., Jia, Q., Wan, Y. The study of the tribological properties of TiB_2/Cr multilayered coatings over a wide temperature range. 2022. Journal of Materials Research and Technology. 16, pp. 290–301.

M.A. Volosova¹, A.P. Mitrofanov¹, Y.R. Meleshkin¹, S.V. Fedorov¹

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF TITANIUM DIBORIDE COATINGS UNDER THERMOMECHANICAL CONDITIONS

¹ Moscow State Technological University «Stankin», Russia;

Abstract

The paper considers the influence of thermal influence on tribological properties of TiB_2 coating in comparison with the known and frequently used TiAlSiN coating on cutting inserts. The results showed that the anti-wear properties of TiB_2 are more pronounced relative to TiAlSiN coating, and this statement is true for all variants of tests with a uniform character of wear of TiB_2 coating. It is established that the temperature effect has a positive effect on the friction coefficient of TiB_2 coating reducing it down to a value of 0.1 with the formation of antifriction film, which under the action of mechanical loads is torn off with a sharp increase in the coefficient of friction, resulting in the coating surface is in the dynamic process of ‘oxidation - wear - removal’. This mechanism provides stable and uniform wear of the coating, whereas TiAlSiN coating undergoes complete destruction with partial damage to the substrate.

Key words: TiB_2 coating, friction coefficient, friction path morphology, wear resistance, elemental analysis, thermal effects.

This work was funded by the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. FSFS-2023-0003.

REFERENCES

- [1] Casais, R., Baptista, A.M., Silva, F.J., Andrade, F., Sousa, V., Marques, M.J. Experimental study on the wear behavior of B_4C and TiB_2 monolayered PVD coatings under high contact loads. 2022. The

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 120, pp. 6585 - 6604.
- [2] Kiryukhantsev – Korneev, P., Sytchenko, A., Kaplanskii, Y., Sheveyko, A., Vorotilo, S., Levashov, E. Structure, Corrosion Resistance, Mechanical and Tribological Properties of ZrB₂ and Zr-B-N Coatings. 2021. Metals. 11, 1194.
 - [3] Schalk, N., Tkadletz, M., Mitterer, C. Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community. 2022. Surface and Coatings Technology. 429, 127949.
 - [4] Petrov, I., Hall, A., Mei, A.B., Nedfors, N., Zhirkov, I., Rosen, J., Reed, A., Howe, B., Greczynski, G., Birch, J., Hultman, L., Greene, J.E. Controlling the boron-to-titanium ratio in magnetron-sputter-deposited TiB_x thin films. 2017. Journal of Vacuum Science & Technology A. 35(5), 050601.
 - [5] Šroba, V., Fiantok, T., Truchlý, M., Roch, T., Zahoran, M., Grančič, Peter Švec, B., Nagy, S., Izai, V., Kúš, P., Mikula, M. Structure evolution and mechanical properties of hard tantalum diboride film. 2020. Journal of Vacuum Science & Technology A. 38(3), 033408.
 - [6] Solovan, M.N., Brus, V.V., Maryanchuk, P.D., Kovalyuk, T.T., Rappich, J., Gluba, M. Kinetic properties of TiN thin films prepared by reactive magnetron sputtering. 2013. Physics of the Solid State. 55(11), pp. 2234-2238.
 - [7] Wang, Z., Fu, T., Xie, B., Wang, H., Ye, P., Pan, X. Self-Lubricating Property of TiB₂-Ni Coating in the Hot Forging Die of Aluminum Alloy. 2022. Coatings. 12, 829.
 - [8] Rao, J., Cruz, R., Lawson, K.J., Nicholls, J.R. Carbon and titanium diboride multilayer coatings. 2004. Diamond and Related Materials. 13, pp. 2221 - 2225.
 - [9] Shi, Y., Chen, Z., Ji, L., Xiao, G., Yi, M., Zhang, J., Chen, H., Xu, C. Cutting performance and antifriction mechanism of Al₂O₃/TiC/TiB₂/h-BN/Al₂O₃ self-lubricating ceramic tool. 2023. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 125, pp. 809 - 818.
 - [10] Grigoriev, S., Volosova, M., Mosyanov, M., Fedorov, S. The Study of Radius End Mills with TiB₂ Coating When Milling a Nickel Alloy. 2023. Materials. 16, 2535.
 - [11] Akgün, M., Kara, F. Analysis and Optimization of Cutting Tool Coating Effects on Surface Roughness and Cutting Forces on Turning of AA 6061 Alloy. 2021. Advances in Materials Science and Engineering. 2021, pp. 466 - 472.
 - [12] Zainal1, A., Zakaria, M.H., Che Ghani, S.A. Investigation on machining performance of TiB₂ and TiN coatings with modified cutting insert in AISI

- 1017 turning. 2020. IOP Conference Series: Materials Science. 788, 012009.
- [13] Alhadeff, L., Marshall, M., Slatter, T. The influence of tool coating on the length of the normal operating region (steady-state wear) for micro end mills. 2019. Precision Engineering. 60, pp. 306 - 319.
 - [14] Lee, K.W., Chung, Y.W., Korach, C., Keer, L.M. Tribological and dry machining evaluation of superhard TiB₂/TiC multilayer coatings deposited on Si(001), M2 steel, and C3 WC cutting tool inserts using magnetron sputtering. 2005. Surface and Coatings Technology. 194, pp. 184-189.
 - [15] Chowdhury, M.S.I., Bose, B., Fox-Rabinovich, G., Veldhuis, S.C. Investigation of the Wear Performance of TiB₂ Coated Cutting Tools during the Machining of Ti6Al4V Alloy. 2021. Materials. 14, 2799.
 - [16] Shuster, L., Fox-Rabinovich, G., Chertovskikh, S. Influence of Cutting Conditions on the Wear Resistance of Tools with a TiB₂ Coating during Titanium Alloy Machining. 2021. Journal of Friction and Wear. 42, pp. 466-472.
 - [17] Zhao, G., Wang, J., Deng Y., Yan, T., Liang, W., Li, T., Zhang, L., Jia, Q., Wan, Y. The study of the tribological properties of TiB₂/Cr multilayered coatings over a wide temperature range. 2022. Journal of Materials Research and Technology. 16, pp. 290–301.