

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ И МЕХАНИЗМ ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ Cr–Si–В ПРИ НАГРУЖЕНИИ ТРЕНИЕМ В ОТСУТСТВИЕ СМАЗКИ

Национальный авиационный университет, vrkk@ukr.net

*Детонационно-газовым методом получено покрытие с композиционного материала Cr–Si–В на стали. Изучено состав, структуру и триботехнические свойства покрытий в сравнении с традиционными материалами на основе Ni–Cr и сплава ВК*

**Вступление.** Для повышения работоспособности поверхностей трения деталей машин, технологического оборудования и инструмента сегодня широко используют разные покрытия. Применение детонационных покрытий является одним из эффективных методов повышения износостойкости подвижных сопряжений машин. Для нанесения износостойких газотермических покрытий на конструкционные сплавы традиционно используют порошки металлических сплавов на основе Ni–Cr с разными добавками металлов (Co, Mo, Y), неметаллов (B, Si) и тугоплавких соединений (карбиды, бориды, окислы алюминия), а также порошки твердых вольфрамовых сплавов марки ВК. Покрытия на основе металлических сплавов характеризуются относительно низкой износостойкостью при высокой стойкости к окислению (до 1100 °С), тогда как покрытия из вольфрамовых сплавов имеют высокую износостойкость при низком сопротивлении высокотемпературной коррозии (до 500–600 °С) [1]. В связи с тенденцией к повышению температур эксплуатации, особенно в условиях знакопеременных нагрузок и агрессивных сред, требования к защитным покрытиям растут и приводят к необходимости создания износостойких покрытий, для которых первоочередное значение приобретает высокая поверхностная твердость в сочетании с упругими свойствами материала. При разработке материалов для детонационно-газового напыления необходимо учитывать технико-экономические ограничения, обуславливаемые требованиями производства, в том числе затрату дефицитных и дорогих компонентов. Из тугоплавких соединений наиболее перспективными являются боридные, карбидные и нитридные соединения титана и хрома [2; 3; 4].

Хром благодаря высокой температуре плавления, жаро- и коррозионной стойкости часто служит основой создания конструкционных материалов. Он принадлежит к тяжелодеформируемым металлам, поэтому изготовление изделий нужной формы из него является сложной научно-технической проблемой. В то же время благодаря высокому уровню твердости, прочности сцепления, низкому коэффициенту трения и коррозионной стойкости хромовые покрытия широко применяются в промышленности [6].

**Цель работы.** Разработка состава и получение порошков системы Cr–Si–B и применение их для нанесения детонационных покрытий с повышенными свойствами для защиты деталей машин, работающих в условиях трения.

**Методика исследований.** Для напыления использовали композиционные порошки системы Cr–Si–B, полученные методом механического легирования. Детонационные покрытия напыляли на рабочие поверхности образцов из стали 45 (после закалки и отпуска; структура – сорбит–тростит) проводили на модернизированной автоматической установке «Днепр-3», толщина покрытия – 0,11–0,20 мм.

При исследованиях детонационных покрытий из композиционных порошковых материалов была реализована программа, которая включает исследование триботехнических свойств от нескольких факторов (скорости, нагрузки, температуры). Состав и структуру покрытия исследовали на электронном микроскопе «Camscan», микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н. Триботехнические исследования образцов с покрытиями системы Cr–Si–B проводили в условиях отсутствия масел на машине трения УТМ-2 по торцевой схеме.

**Результаты исследований и обсуждения результатов.** Характеристики металлических фаз напыленного слоя, а также получение вторичных структур с определенными свойствами существенно зависят от химического состава исходного материала. Сначала экспериментальным путем определяли оптимальное содержание кремния в системе. Для этого на основу напыляли композиционный материал Cr–Si с разным процентным содержанием Si, после определяли микротвердость полученных покрытий. Характер изменения микротвердости в зависимости от содержания Si показан на рис 1.

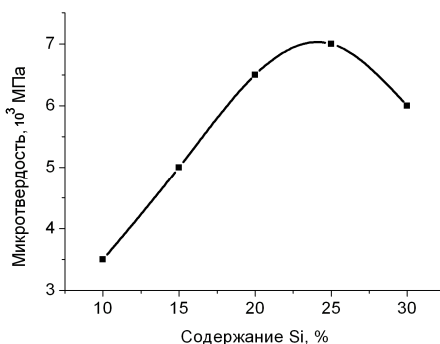


Рис. 1. Характер изменения микротвердости в зависимости от содержания Si

Как видно из графика, 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 детонационно-газовым методом композиционные порошки Cr–Si–B, зависимость интенсивности изнашивания и микротвердости от содержания бора проиллюстрирована на рис. 2

Наименьшими значениями интенсивности изнашивания, как видно, обладают при данных условиях испытаний покрытия, полученные из композиционного материала, содержащего 12% бора. Эти же покрытия имеют наибольшую микротвердость – 7–8 ГПа. Изменение физико-механических свойств при изменении фазового состава покрытия показано в таблице. Как видно, введение бора в состав композиционного порошка значительно улучшает физико-механические свойства покрытий: увеличивается предел прочности до разрушения, прочность сцепления с основой и микротвердость.

#### Изменение физико-механических свойств при изменении фазового состава

Покрытие	Толщина, мм	Предел прочности до разрушения ГПа	Прочность сцепления с основой, МПа	Микротвердость, ГПа
Cr–Si	0,14–0,20	0,65–0,78	50–83	6,0–6,9
Cr–Si–B	0,11–0,20	0,79–0,87	74–92	10,5–12,3

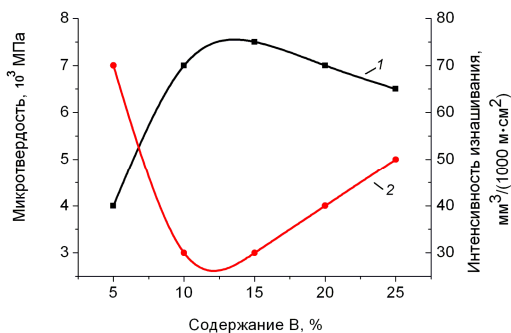


Рис. 2. Зависимость микротвердости (1) и интенсивности изнашивания (2) покрытия от содержания В

Это объясняется формированием при нанесении покрытий тугоплавких боридных фаз типа:  $\text{CrB}$ ,  $\text{Cr}_2\text{B}$ ,  $\text{Cr}_3\text{B}_4$ ,  $\text{CrBr}_2$ . Взаимодействие хрома и кремния приводит к образованию твердых износостойких силицидов хрома  $\text{CrSi}$ ,  $\text{Cr}_2\text{Si}_3$ ,  $\text{CrSi}_2$ . Рентгеноструктурный анализ обнаружил также наличие твердых растворов бора в хrome и кремнии и твердый раствор кремния в хrome.

Таким образом, бориды и силициды, представляющие собой дисперсные частицы, препятствуют процессам пластической деформации. Кроме того, они частично растворяются в хrome и повышают энергию связи в атомах, входящих в твердый раствор. Все это способствует повышению износостойкости покрытий, нагруженных трением. 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 ниохрома, дополнительно легированного бором и алюминием.

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

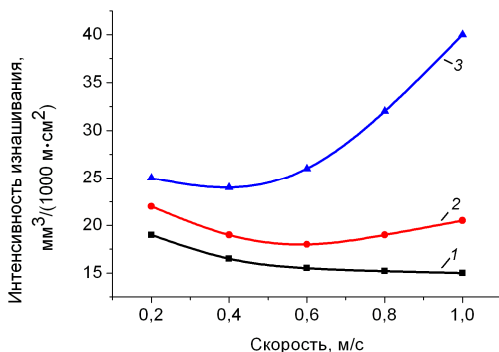


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания покрытий от скорости: 1 – BK-15; 2 – Cr-Si-B; 3 – Ni-Cr-Al-B

При этом увеличение скорости не влияет существенно на интенсивность изнашивания покрытия на основе Cr-Si-B. Поверхности трения не испытывают значительных повреждений, на них видны лишь следы направленной пластической деформации без явных признаков схватывания (рис 4). Результаты исследований, определяющие зависимость интенсивности изнашивания от температуры, представленные на рис. 5. Исследования проводились при постоянной нагрузке  $P = 0,5$  МПа и скорости скольжения  $V = 0,5$  м/с.

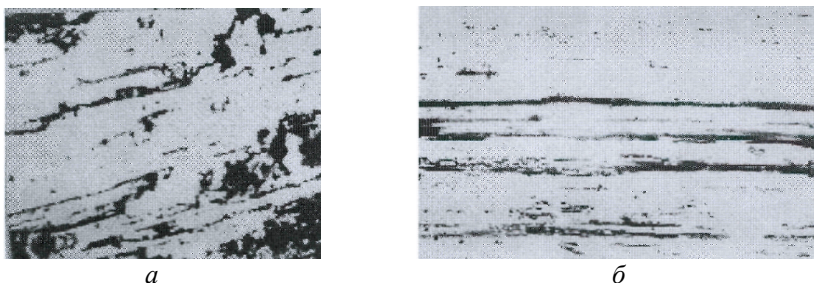


Рис. 4. Микрофотографии поверхностей трения покрытий на основе Cr-Si-B в парах трения с образцами из стали 45 при скоростях скольжения: а – 0,6 м/с; б – 10 м/с ( $\times 320$ )

Наименьшими значениями интенсивности износа, как видно, обладают при данных условиях исследований детонационные покрытия на основе Cr-Si-B; происходит устойчивый процесс механохимического изнашивания. Увеличение температуры почти не

ухудшает характеристик трения и износа, так как на поверхности интенсивно образуются структуры, имеющие высокие антифрикционные свойства. Принудительное нагревание интенсифицирует процессы взаимодействия поверхности трения с кислородом воздуха, в результате чего образуются пленки вторичных структур. Природа их образования зависит от условий трения, материалов пары и состава среды в зоне контакта. При трении в нормальных атмосферных условиях на поверхности образуются тонкие пленки окислов [5; 6].

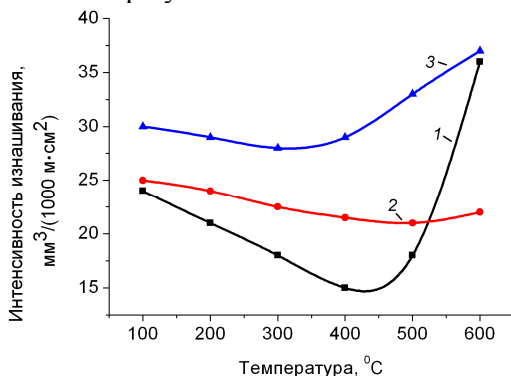


Рис. 5. Зависимость интенсивности изнашивания покрытий от температуры: 1 – ВК-15; 2 – Cr-Si-B; 3 – Ni-Cr-Al-B

Стабильность боридов меньше, чем окислов. Продуктами окисления боридов являются окислы металла и борный ангидрид. Можно допустить, что пленка окисла на рабочих поверхностях состоит из шпинели  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  и окислов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}$ . В данном случае окислы связываются борным ангидридом в аморфную пленку, обладающую высокими износостойкими свойствами. Наличие  $\text{B}_2\text{O}_3$  обусловлено тем, что высшие бориды хрома при взаимодействии с кислородом окружающей среды распадаются на окисел хрома и борный ангидрид, который при повышенных температурах имеет малую вязкость и очень активно взаимодействует с другими окислами.

Повышение температуры испытаний почти не влияет на интенсивность изнашивания покрытия на основе Cr-Si-B, процесс механохимического изнашивания стойкий. В процессе испытаний нихрома установлено, что нагрев образцов больше чем на 400 °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 °С и происходит интенсивное окисление карбида вольфрама и размягчение связки, что обуславливает снижение триботехнических свойств покрытий. Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузок проиллюстрирована на рис. 6. Испытания проводились при  $V = 0,5$  м/с.

Анализируя экспериментальные данные можно отметить следующее. Характерным является незначительное увеличение износа с ростом нагрузки. Рост удельного давления обуславливает увеличение фактической площади контакта, а также молекулярного взаимодействия поверхностей. Интенсивность изнашивания при этом несколько возрастает.

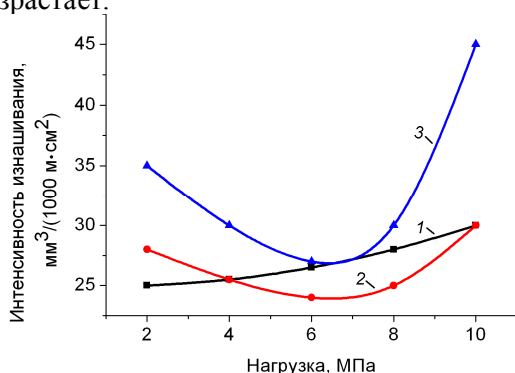


Рис. 6. Зависимость интенсивности изнашивания покрытий от нагрузки: 1 — ВК-15; 2 — Cr-Si-B; 3 — Ni-Cr-Al-B

Так, интенсивность изнашивания покрытия из легированного нихрома при увеличении нагрузки до 8 МПа практически не растет. Последующее увеличение нагрузки обуславливает более-менее равномерный рост интенсивности изнашивания, что объясняется качественным изменением вида износа и появлением точек схватывания.

Увеличение нагрузки не влияет существенно на интенсивность изнашивания детонационных покрытий на основе композиционного материала Cr-Si-B. Такая высокая работоспособность покрытия обуславливается протеканием в широком диапазоне нагрузок универсального явления структурной приспособляемости при трении. Поверхностный слой покрытия в результате пластической деформации при трении переходит в термодинамически неравновесное активированное состояние, из которого путем адсорб-

ционно-диффузионного и химического взаимодействия с окружающей средой пытается перейти в пассивное состояние. В результате этого взаимодействия образуются гетерофазные тонкопленочные вторичные структуры [7; 8]. По данным рентгенофазного анализа они представляют собой сплошную и плотную пленку состава  $\text{SiO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и борного ангидрида.

Образование вторичных структур происходит в определенном диапазоне режимов трения при наличии динамического равновесия процессов активации и пассивации. Если в силу влияния внешних условий динамическое равновесие сдвигается в сторону увеличения энергии активации, то достаточно крепкого и износостойкого слоя вторичных структур, защищающих основной материал пары трения от непосредственного взаимодействия не образуется, и процесс трения происходит в условиях повреждений, тогда происходит схватывание.

Металлографический анализ и профилографирование свидетельствуют о том, что поверхность трения покрытия  $\text{Cr-Si-B}$  имеет достаточную чистоту и выделяется отсутствием заметных повреждений (рис. 7). Отдельные источники схватывания, что возникают в данных условиях трения, локализуются в тонких поверхностных слоях.

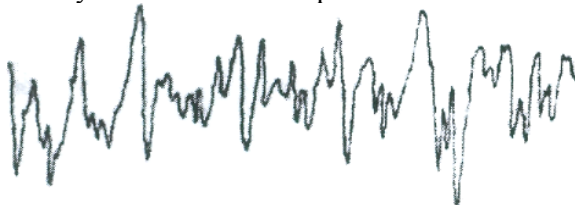


Рис. 7. Профилограмма поверхности трения покрытия на основе  $\text{Cr-Si-B}$  при 2,5 МПа; ВУ×1000; ГУ×40

## Выводы

Исследования детонационных покрытий в воздушной среде в условиях отсутствия смазки показали высокие износостойкие свойства композиционных безвольфрамовых покрытий на основе  $\text{Cr-Si-B}$ . Износостойкость детонационных покрытий из легированного никрома при высоких температурах обусловлена как характеристиками металлических фаз напыленного слоя, так и свойствами пленок окислов, образующихся в процессе трения. Пленки окислов активно препятствуют процессам контактного схватывания, при этом исключают влияние трения на основной материал покрытия, чем определяют высокие антифрикционные характеристики пары трения.



Наиболее качественные и износостойкие покрытия формируются при использовании порошков со следующим массовым содержанием компонентов: В – 10–15%; Si – 2–25%; Cr – 60–65%.

### Список литературы

1. Гамуля Г. Д. Триботехнические свойства материалов, предназначенных для работы в экстремальных условиях / Г. Д. Гамуля, Е. Л. Островская. Юно Т. П. // Порошковая металлургия. – 2001. – №3/4. – С. 47–56.

2. Уманский А. П. Структура и свойства плазменных покрытий из композиционных порошковых сплавов системы (TiCrC) - (FeCr)/ А. П. Уманский, В. П. Коновал // Порошковая металлургия. – 2007. – №3/4. – С. 37–45.

3. 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.

4. 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.

5. Макаренко Г.Н. Синтез, жаростойкость и оптические свойства силицида бора и материалов на его основе/ Г.Н. Макаренко, В.Б. Федорук // Порошковая металлургия. – 2007. – №3/4. – С. 45–51.

6. Игнатович С.Р. Износостойкость керамических детонационных покрытий на основе тугоплавких соединений титана-хрома / С.Р. Игнатович, Е.П. Дворник // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2006. – Вип. 46. – С. 170–175.

7. Машков Ю. А. Трибология конструкционных материалов/ Ю. А. Машков // Омск.: ОмГТУ. – 2001 – С. 299.

8. Основы трибологии // Под ред.. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение. – 2001. – С. 664.

**Недайборщ С. Д. Закономірності і механізм зношування детонаційних покриттів Cr-Si-B при навантаженні тертям у відсутності змащування** // Проблемы тертя та зношування: наук. техн. зб. – К: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип.54 – С.163–171.

Детонаційно-газовим методом отримане покриття з композиційного матеріалу Cr-Si-B на сталі. Вивчено склад, структуру і триботехнічні властивості покриттів у порівнянні з традиційними матеріалами на основі Ni-Cr і сплаву ВК.

### **Laws and mechanism of wear detonation coatings Cr-Si-B with friction loading in the absence of grease**

The detonation-gas method is used to cover a composite Cr-Si-B on steel. The composition, structure and tribological properties of the coatings compared with Ni-Cr alloy and BK basis have been considered.

Стаття надійшла до редакції 24.10.2010